

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



## **Desenvolvimento e implementação de um Sistema de Seguimento Solar Ativo para sistemas fotovoltaicos**

**Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente**

Dário Djon Delgado Lopes

Dissertação orientada por:

Orientador: Prof. Doutor Miguel Centeno Brito (FCUL)

Co-Orientador: José Mário da Costa Pó (FCUL)

2016



UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



## **Desenvolvimento e implementação de um Sistema de Seguimento Solar Ativo para sistemas fotovoltaicos**

**Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente**

Dário Djon Delgado Lopes

Dissertação orientada por:

Orientador: Prof. Doutor Miguel Centeno Brito (FCUL)

Co-Orientador: José Mário da Costa Pó (FCUL)

2016



## Resumo

Esta dissertação tem como finalidade o desenvolvimento e implementação de um sistema de seguimento solar de dois eixos, para sistemas fotovoltaicos. Um módulo com inclinação e orientação fixos só se aproxima da sua potência máxima ao meio dia solar, pelo que a melhor forma de aumentar a área útil de conversão de energia é a realização do seguimento solar, em que os raios solares são sempre normais ao plano dos módulos, aumentando a eficiência do sistema. Para este projeto, desenvolveu-se um sistema de controlo de seguimento solar recorrendo a sensores de luz e uma plataforma de prototipagem eletrónica, o Arduino. O funcionamento do sistema tem por base a comparação de sinais dos sensores, quando expostos a intensidades luminosas diferentes, para a determinação da posição solar e daí atuar em atuadores lineares responsáveis pelo posicionamento da estrutura que contém os módulos PV, mantendo-os sempre perpendiculares aos raios solares. Após a montagem do sistema, no Campus Solar da FCUL, realizou-se uma campanha de recolha de dados com duração de 22 dias, de modo a analisar o desempenho do sistema em termos de qualidade do seguimento solar, produção e consumo de energia por parte do sistema de controlo. Para os dias de céu limpo e os dias de céu nublado obtiveram-se resultados diferentes, cuja distinção foi feita utilizando dados de irradiância de uma estação meteorológica instalada do mesmo local. Verificou-se que para os dias de céu limpo o seguidor acompanha a trajetória do Sol durante todo o dia, o resulta em ganhos de produção até 45% em relação a um sistema fixo com as mesmas características. Para os dias de céu nublado, o seguidor procura as zonas mais claras do céu, nos instantes em que o Sol está obstruído. De forma geral, obteve-se um consumo de energia média de 1% da produção total.

**Palavras-Chave:** Seguidor Solar, Fotovoltaico, Arduino, Energia.

## Abstract

The purpose of this thesis is the development and implementation of a two axis solar tracker system, for photovoltaic systems. A module with fixed tilt and orientation only approaches the maximum power at solar noon, therefore the best way to increase the useful area of energy conversion is the realization of solar tracking, where the solar rays are always normal to the plan of the modules, increasing the system efficiency. For this project, a solar tracking control system was created using light sensors and an electronics prototyping platform, the Arduino. The system operation is based on the comparison of signals from the sensors, exposed to different light intensities, to determine the solar position and then act on linear actuators responsible for positioning the structure containing the PV modules and keeping them always perpendicular to the sun rays. After the system installation, located at FCUL's Solar Campus, a data collection campaign for 22 days was held, in order to analyze the system performance in terms of tracking quality, energy production and consumption of the control system. Different results were obtained for clear sky and cloudy days, whose characteristics were obtained from the radiation data of a meteorological station installed on the same location. For clear sky days, the tracker follows the solar trajectory throughout the day, resulting in production gains up to 45% with respect to a fixed system with the same characteristics. For cloudy sky days, the tracker searches for the brightest areas of the sky during the time periods when the sun is obstructed by the clouds. In general, the system's average electric power consumption was about 1% of the total electric production.

**Keywords:** Solar Tracker, Photovoltaic, Arduino, Energy.



# Índice

Resumo.....	i
Abstract .....	i
Índice de Figuras .....	v
Índice de Tabelas.....	vi
Agradecimentos.....	vii
Simbologia e Notações.....	ix
1. Introdução .....	1
2. Estudo da radiação solar.....	3
2.1 Radiação solar .....	3
2.1.1 Radiação extraterrestre.....	3
2.1.2 Efeitos atmosféricos na radiação solar .....	3
2.1.3 Coeficiente de massa de ar .....	4
2.1.4 Distribuição espectral da radiação .....	4
2.1.5 Medição da radiação solar.....	5
2.2 Relações astronómicas Terra-Sol .....	6
2.2.1 Sistema de coordenadas locais: latitude e longitude .....	6
2.2.2 Equação do tempo .....	6
2.2.3 Fator de correção do tempo .....	7
2.2.4 Declinação solar .....	7
2.2.5 Ângulo horário .....	8
2.2.6 Ângulo zenital .....	8
2.2.7 Altitude solar.....	8
2.2.8 Azimute solar .....	8
2.2.9 Nascer e pôr-do-sol .....	9
3. Energia fotovoltaica – Estado da Arte.....	11
3.1 O mercado da energia fotovoltaica.....	11
3.2 Sistemas fotovoltaicos.....	11
3.2.1 Sistemas Autónomos .....	11
3.2.2 Sistemas ligados à rede .....	12
3.3 Componentes de um sistema fotovoltaico.....	13
3.3.1 Células fotovoltaicas .....	13
3.3.2 Armazenamento .....	13
3.3.3 Controladores/ Reguladores de carga.....	13
3.3.4 Inversores DC/AC.....	13
3.4 Sistemas estacionários e de seguimento.....	14
3.4.1 Sistemas estacionários.....	14
3.4.2 Sistemas de seguimento solar.....	14
3.5 Métodos de seguimento solar.....	17

4.	Desenvolvimento do protótipo de seguimento solar .....	19
4.1	Caracterização do sistema .....	19
4.1.1	Módulos fotovoltaicos .....	19
4.1.2	Atuadores lineares .....	19
4.1.3	Sistema de controlo robótico .....	21
4.1.4	Inversor.....	21
4.1.5	Sistema de Comunicação .....	22
4.1.6	Esquema elétrico da instalação.....	22
4.2	Implementação da solução alternativa .....	23
4.2.1	Sistema de Controlo .....	23
4.2.2	Microcontroladores .....	24
4.2.3	Sensores de luminosidade .....	26
4.2.4	Estratégia de seguimento solar com os sensores de radiação.....	28
4.2.5	Estratégia de seguimento com calendário solar.....	31
4.2.6	Acelerómetro digital.....	32
4.2.7	Controlo dos atuadores lineares .....	33
4.2.8	Circuito experimental geral .....	34
4.3	Monitorização do sistema.....	36
4.3.1	Dados de seguimento .....	36
4.3.2	Dados de produção de energia.....	37
4.3.3	Dados de consumo de energia .....	38
5.	Apresentação e discussão dos resultados .....	39
5.1	Qualidade do seguimento solar .....	39
5.1.1	1º Caso de estudo: Dia de céu limpo .....	41
5.1.2	2º Caso de estudo: Dia de céu nublado .....	43
5.2	Produção de energia .....	46
5.2.1	1º Caso de estudo: Dia de céu limpo .....	47
5.2.2	2º Caso de estudo: Dia de céu nublado .....	48
5.2.3	Resultados gerais de produção de energia.....	48
5.3	Consumo de energia.....	51
5.3.1	1º Caso de estudo: Dia de céu limpo .....	51
5.3.2	2º Caso de estudo: Dia de céu nublado .....	52
5.3.3	Resultados gerais de consumo de energia .....	53
6.	Conclusões e trabalhos futuros.....	55
	Referências bibliográficas .....	57



# Índice de Figuras

Figura 2.1. Variação da densidade de radiação extraterrestre ao longo do ano [8].	3
Figura 2.2. Distribuição da radiação na atmosfera terrestre [10].	4
Figura 2.3. Espectro solar [11].	5
Figura 2.4. Equipamentos de medição da radiação solar. a) Pireliómetro; b) Piranómetro [13].	5
Figura 2.5. Latitude e Longitude [10].	6
Figura 2.6. Variação da equação do tempo ao longo do ano [8].	7
Figura 2.7. Variação declinação solar da Terra ao longo do ano [14].	8
Figura 2.8. Representação do zénite, elevação e azimuth solar [14].	9
Figura 3.1. Potencial de produção de eletricidade solar na Europa [18].	11
Figura 3.2. Esquema de um sistema fotovoltaico autónomo [20].	12
Figura 3.3. Esquema de um sistema fotovoltaico ligado à rede [19].	12
Figura 3.4. Tipos de Seguidores solares existentes [27].	15
Figura 3.5. Seguidores de 1 eixo. a) Eixo horizontal; b) Eixo vertical; c) Eixo inclinado [31].	15
Figura 3.6. Seguidores de dois eixos. a) Seguidor de azimuth-altitude; b) Seguidor polar [22].	16
Figura 3.7. Concentrador fotovoltaico [22].	17
Figura 4.1. A- Sistema de seguimento solar de dois eixos; B-Atuadores lineares responsáveis pelo seguimento.	20
Figura 4.2. Interruptores de fim de curso e outros componentes instalados no atuador.	20
Figura 4.3. Caixa de controlo SunGravity utilizada pela WS Energia.	21
Figura 4.4. Inversor Sunny Boy utilizado no sistema.	21
Figura 4.5. Sunny WebBox.	22
Figura 4.6. Informações disponibilizadas pelo sistema de comunicação e envio de dados.	22
Figura 4.7. Esquema elétrico da instalação [35].	23
Figura 4.8. Sistema de controlo do seguimento.	24
Figura 4.9. Arduino UNO [40].	24
Figura 4.10. Interface de programação do Arduino.	25
Figura 4.11. Adafruit Data logging shield [41].	26
Figura 4.12. Circuito auxiliar para obtenção do sinal do LDR.	26
Figura 4.13. Base para a colocação dos sensores.	27
Figura 4.14. Relação entre o ângulo de incidência dos raios solares e as características da pala.	28
Figura 4.15. A- Impressora 3D LeapFrog; B- Processo de impressão do suporte dos sensores.	28
Figura 4.16. Valores atribuídos a cada conjunto de sensores.	29
Figura 4.17. Processo de seguimento: A- Seguimento Azimutal; B- Seguimento Vertical.	30
Figura 4.18. Parafuso para a ativação dos interruptores de fim de curso instalado no veio do braço mecânico.	31
Figura 4.19. Circuito auxiliar para contagem de pulsos do Reed Switch.	31
Figura 4.20. Acelerómetro [43].	32
Figura 4.21. Instalação do acelerómetro na placa.	33
Figura 4.22. Circuito de controlo dos motores.	33
Figura 4.23. Circuito geral de controlo do sistema de seguimento.	35
Figura 4.24. Caixa com a montagem experimental.	36
Figura 4.25. Estação meteorológica instalada no Campus Solar da FCUL [30].	37
Figura 4.26. Kit Cloogy para a monitorização do consumo de energia do sistema [44].	38
Figura 5.1. Irradiância direta (DNI) medida entre os dias 21 e 27 de agosto de 2015.	39
Figura 5.2. Trajetória do Sol e do sistema de seguimento entre 21 e 27 de agosto de 2015. A- Comparação dos ângulos de elevação solar calculados e medidos no sistema. B- Comparação dos ângulos de azimuth solar calculados e medidos no sistema.	40
Figura 5.3. Irradiância direta (DNI) medida entre 5 e 11 de setembro de 2015.	40
Figura 5.4. Trajetória do Sol e do sistema de seguimento entre 5 e 11 de setembro de 2015: A- Comparação dos ângulos de elevação solar calculados e medidos no sistema. B- Comparação dos ângulos de azimuth solar calculados e medidos no sistema.	41
Figura 5.5. Irradiância direta (DNI) medida no dia 06/09/15.	41

Figura 5.6. Trajetória do Sol e do sistema de seguimento no dia 06/09: A- Comparação dos ângulos de elevação solar calculados e medidos no sistema. B- Comparação dos ângulos de azimuth solar calculados e medidos no sistema.....	42
Figura 5.7. Desvio dos eixos do sistema de seguimento em relação a trajetória teórica para o dia 06/09.....	43
Figura 5.8. Irradiância direta (DNI) medida no dia 24/08/15. ....	43
Figura 5.9. Trajetória do Sol e do sistema de seguimento no dia 24/08: A- Comparação dos ângulos de elevação solar calculados e medidos no sistema. B- Comparação dos ângulos de azimuth solar calculados e medidos no sistema.....	44
Figura 5.10. Desvio dos eixos do sistema de seguimento em relação a trajetória teórica para o dia 24/08.....	45
Figura 5.11. Comparação da produção do sistema de seguimento de dois eixos com a estimativa de produção de um sistema fixo entre 21 e 27 de agosto de 2015. ....	46
Figura 5.12. Comparação da produção do sistema de seguimento de dois eixos com a estimativa de produção de um sistema fixo entre 05 e 11 de setembro de 2015. ....	46
Figura 5.13. Comparação da produção do sistema de seguimento de dois eixos com a estimativa de produção de um sistema com seguimento ideal e com um sistema fixo no dia 06/09. ....	47
Figura 5.14. Comparação da produção do sistema de seguimento de dois eixos com a estimativa de produção de um sistema com seguimento ideal e com um sistema fixo no dia 24/08. ....	48
Figura 5.15. Produção de energia do sistema de seguimento real e ideal e do sistema fixo para todos os dias da campanha experimental. ....	49
Figura 5.16. Ganhos do sistema de seguimento real e da estimativa ideal em relação ao sistema fixo para todos os dias da campanha experimental.....	50
Figura 5.17. Energia normalizada do sistema de seguimento e do sistema fixo. ....	51
Figura 5.18. Consumo de energia do sistema medido no dia 06/09.....	52
Figura 5.19. Consumo de energia do sistema medido no dia 24/08.....	52
Figura 5.20. Energia consumida e a respectiva fração da produção do sistema de seguimento. ....	53

## Índice de Tabelas

Tabela 4.1. Características dos módulos fotovoltaicos do sistema [35].....	19
Tabela 4.2. Características do Arduino UNO [40].....	25
Tabela 4.3. Exemplo de alguns dados recolhidos para o dia 23 de Agosto. ....	36

## Agradecimentos

*O desenvolvimento desta dissertação só foi possível devido ao apoio de várias pessoas, às quais deixo aqui os meus sinceros agradecimentos:*

*Aos meus orientadores Prof. Miguel Brito, José Mário Pó e David Pera pela orientação, apoio, acompanhamento e disponibilidade no decorrer do projeto, assim como pelas críticas, correções e sugestões que muito contribuíram para a conclusão do trabalho.*

*Aos meus pais, João Lopes e Maria da Luz, aos meus irmãos, irmãs e à toda a minha família pelo amor, carinho, incentivo e apoio incondicional e sem os quais não seria possível superar mais uma etapa da minha vida.*

*À minha namorada, Conceição Andrade, pelo amor, carinho, companheirismo, apoio e pelas palavras de incentivo sempre que necessário.*

*Aos meus amigos e colegas, em especial ao José Sousa pelo auxílio na montagem do sistema sempre que foi preciso.*

*Ao Ivo Costa e ao Ivo Bernardo pelo apoio nos trabalhos de laboratório e no desenvolvimento do meu sistema.*

*À todos que direta e indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste projeto, obrigado!*



## Simbologia e Notações

$\lambda_{\text{SMT}}$	Longitude do meridiano de referência (°)
$\lambda_{\text{LOC}}$	Longitude local (°)
$\omega$	Ângulo horário (°)
$\alpha_s$	Altura Solar (°)
$\gamma_s$	Ângulo Azimutal (°)
$\delta$	Declinação Solar (°)
$\theta_i$	Ângulo de Incidência dos raios solares (°)
$\theta_z$	Ângulo Zenital (°)
$E_t$	Equação do tempo (min)
$\Gamma$	Ângulo do dia (rad)
$\Phi$	Latitude (°)
$\lambda$	Longitude (°)
$\psi$	Orientação dos módulos PV (°)
$\beta$	Inclinação dos módulos PV (°)
$\vec{n}$	Vetor de posição de um módulo PV (°)
$\vec{v}$	Vetor de posição do Sol (°)
AM	<i>Air Mass</i>
A	Área do módulo (m <sup>2</sup> )
ABS	<i>Acrylonitril Butadiene Styrene</i>
a <sub>Si</sub>	<i>Amorphous Silicon</i>
a	Altura da pala (cm)
b	Distância dos sensores ao centro da circunferência (cm)
CL	Correção da Longitude (min)
CIGS	<i>Copper Indium Gallium Selenide</i>
CdTe	<i>Cadmium Telluride</i>
DHI	<i>Diffuse Horizontal Irradiance</i> (W/m <sup>2</sup> )
DNI	<i>Direct Normal Irradiance</i> (W/m <sup>2</sup> )
DGES	Direção Geral de Energia e Geologia
DC/AC	<i>Direct Current / Alternated Current</i>
EPIA	<i>European Photovoltaic Industry Association</i>
FCUL	Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

GSM	<i>Global System for Mobile Communication</i>
GHI	<i>Global Horizontal Irradiance</i> (W/m <sup>2</sup> )
GNI	<i>Global Normal Irradiance</i> (W/m <sup>2</sup> )
G <sub>on</sub>	Densidade de radiação extraterrestre (W/m <sup>2</sup> )
HIT	<i>Heterojunction with Intrinsic Thin layer</i>
I <sub>sc</sub>	Corrente de curto-circuito (A)
I <sub>MPP</sub>	Corrente do ponto de potência máxima (A)
I <sup>2</sup> C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
I/O	<i>Input/Output</i>
ID	Sensor Inferior Direito
IE	Sensor Inferior Esquerdo
LED	<i>Light Emitting diode</i>
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i>
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
N	Dia do ano (dia juliano)
n	Número de módulos fotovoltaicos
PV	Fotovoltaico
P	Densidade de energia extraterrestre (W/m <sup>2</sup> )
P <sub>MAX</sub>	Potência máxima (W)
P <sub>est</sub>	Potência instantânea estimada de um sistema fixo (W)
P <sub>est ideal</sub>	Potência instantânea estimada de sistema de seguimento biaxial (W)
PLA	<i>Polyactic Acid</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
S	Constante solar (1366 W/m <sup>2</sup> )
STL	<i>Standard Triangle Language (STereoLithography)</i>
SD	Sensor Superior Direito
SE	Sensor Superior Esquerdo
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
SPI	<i>Serial Pheripheral Interface</i>
TRL	Tempo de relógio local
TLA	Tempo local aparente
TSV	Tempo solar verdadeiro
T <sub>ns</sub>	Hora do nascer do sol

$T_{ps}$	Hora do pôr-do-sol
$T_{dia}$	Duração do dia
UA	Unidade Astronómica ( $1 \text{ UA} = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$ )
$V_{MPP}$	Tensão do ponto de potência máxima (V)
$V_{OC}$	Tensão de circuito aberto (V)
$V_{out}$	Tensão de saída (V)
$V_{in}$	Tensão de entrada (V)
VD	Valor Lado Direito
VE	Valor lado Esquerdo
VS	Valor Superior
VI	Valor Inferior
3D	3 Dimensões





## 1. Introdução

As fontes de energias renováveis são cada vez mais uma parte importante na geração de eletricidade no novo milénio. Além da contribuição para a redução das emissões de gases com efeito de estufa, acrescentam muita flexibilidade ao mix energético, reduzindo a dependência dos combustíveis fósseis. Entre as fontes de energias renováveis, a energia solar representa o recurso mais essencial e o pré-requisito de energia sustentável pela sua omnipresença e abundância. Independentemente da variabilidade da luz solar, a energia solar está amplamente disponível e completamente livre de qualquer custo, e ganha cada vez mais preponderância devido aos avanços na tecnologia de fabricação e no aumento de eficiência das células solares [1] [2].

Hoje em dia os sistemas fotovoltaicos são bem aceites, reconhecidos e cada vez mais utilizados na conversão de energia solar para aplicações de produção de energia elétrica [2]. O processo de transformação da radiação solar em eletricidade é feito principalmente por sistemas planos e de concentração, em que a energia gerada depende de muitos fatores, incluindo a quantidade de radiação recebida do Sol, pelo que o ângulo ótimo dos coletores solares tem sido muito estudado. No entanto, dado que a posição do Sol está em constante variação ao longo do dia, o método mais eficiente para aumentar o rendimento dos sistemas passa pelo processo de seguimento solar [3]. O maior obstáculo para a utilização da energia solar passa pelo custo inicial dos sistemas, especialmente dos módulos fotovoltaicos. Há uma necessidade de redução do custo e do espaço utilizado e simultaneamente, um aumento da energia produzida, conseguida através do seguimento do Sol. Quando realizada nos dois eixos, o seguimento aumenta até 50% o aproveitamento da energia, em relação a um sistema com orientação e inclinação fixos, dependendo da localização [4].

O seguimento solar realizado de forma ativa recorre principalmente a microcontroladores para o cálculo da posição solar em determinados intervalos de tempo, ao comando de motores e a obtenção de resposta do sistema, pelo uso de vários sensores [5].

A presente dissertação tem como propósito o desenvolvimento e a implementação de um sistema de seguimento solar ativo biaxial para sistemas fotovoltaicos, em ambiente real. O desenvolvimento deste sistema contempla a utilização de microcontroladores e prototipagem eletrónica para a criação de um sistema de controlo de atuadores lineares e de um algoritmo de seguimento solar. O protótipo desenvolvido substitui o sistema de controlo original de um seguidor de dois eixos da WS Energia, localizado no Campus Solar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL), dado que este não funciona. O não funcionamento do sistema é devido a vários problemas no circuito de controlo e nos atuadores lineares, corrigidos pelo novo sistema implementado.

Os principais objetivos do projeto passam pelos seguintes tópicos:

- Estudo da tecnologia e desenvolvimento e implementação de uma solução de seguimento solar eficiente e de custo reduzido;
- Instalação do sistema de seguimento solar e realização de uma campanha experimental para a obtenção dos dados necessários;
- Avaliação do desempenho do sistema, em termos de funcionalidade e eficiência na produção e no consumo de energia.

No processo de instalação e durante o período de testes do novo sistema desenvolvido, contou-se com alguns contratemplos que dificultaram e prolongaram os trabalhos de campo. Foi necessário a intervenção dos bombeiros para a remoção de ninhos de vespas nas calhas do sistema, assim como a substituição de peças danificadas do circuito implementado, devido a curto-circuitos provocados pela chuva.

A dissertação está estruturada em vários capítulos, apresentando-se primeiramente o estudo da radiação solar e das relações astronómicas indispensáveis a determinação da posição do Sol e a realização do seu seguimento assim como o estudo do estado da arte da tecnologia solar fotovoltaica, através da análise dos vários tipos de sistemas e dos seus componentes e ainda dos vários processos

de seguimento solar existentes. Posteriormente apresenta-se as características do sistema assim como a metodologia utilizada no desenvolvimento do algoritmo de seguimento, através da análise de todos os componentes e o seu papel no funcionamento do mesmo. Seguidamente apresentam-se os resultados obtidos e a discussão dos vários aspetos necessários para a avaliação do desempenho do sistema desenvolvido, em que a qualidade do seguimento realizado, a produção e o consumo de energia figuram como sendo os aspetos principais da análise. Por fim encontram-se apresentadas as principais conclusões da dissertação e do trabalho experimental desenvolvido, assim como os trabalhos futuros a desenvolver.

## 2. Estudo da radiação solar

### 2.1 Radiação solar

A radiação total emitida pelo Sol é equivalente a radiação de um corpo negro à temperatura de 5776 K [6]. À superfície do Sol, apresenta um valor de cerca de  $5.96 \times 10^7 \text{ W/m}^2$  e a medida que a distância aumenta, a quantidade de energia recebida por um objeto no espaço é cada vez menor, dado que a energia proveniente do Sol é espalhada por uma área cada vez maior. Assim, a densidade de energia será dependente apenas da distância a que o objeto está situado.

No topo da atmosfera terrestre, à distância média Terra-Sol, o fluxo de radiação recebido numa superfície normal aos raios solares por unidade de área é conhecido como Constante Solar e possui o valor de  $1366 \text{ W/m}^2$  [6].

#### 2.1.1 Radiação extraterrestre

A distância Terra-Sol apresenta uma variabilidade devido à órbita da Terra em torno do Sol ser uma elipse, apresentando em alguns momentos um valor menor e em outros um valor maior. Assim, a densidade de energia dada pela equação 1 apresenta também uma variação de cerca de  $\pm 3.4\%$  em relação a densidade média de potência dada pela constante solar, tendo um valor maior em Janeiro devido à Terra estar mais próximo do Sol e um valor menor em Junho, quando a Terra está mais afastada do Sol [7].

$$\frac{P}{S} = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{360(N - 2)}{365}\right) \quad (1)$$

A variação da densidade de radiação extraterrestre  $G_{on}$ , depende do dia do ano, representado por N tomando o valor 1 para o dia 1 de janeiro e 365 para o dia 31 de dezembro, é apresentada na Figura 2.1.

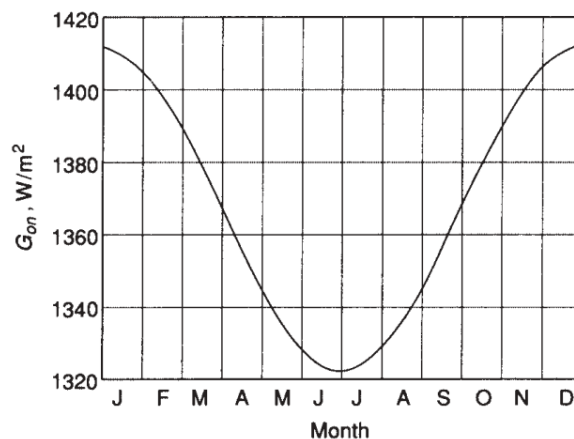


Figura 2.1. Variação da densidade de radiação extraterrestre ao longo do ano [8].

#### 2.1.2 Efeitos atmosféricos na radiação solar

Ao passar pela atmosfera terrestre, a radiação solar é decomposta em diferentes componentes. Uma parte desta radiação é absorvida pelas nuvens, por elementos presentes na atmosfera como o ozono, oxigénio, dióxido de carbono e vapor de água (20%) e outra parte sofre dispersão para o espaço (30%), fazendo com que apenas uma fração da radiação chegue à superfície terrestre e desta, uma parte é ainda refletida para a atmosfera, como se ilustra na Figura 2.2 [9] [10].

Assim, após interação com a atmosfera, a radiação que atinge um objeto ou superfície à superfície terrestre pode ser decomposta em várias componentes [9] [10]:

- Radiação direta – radiação recebida diretamente do disco solar numa superfície normal aos raios solares;

- Radiação difusa – representa a radiação total vinda da abóbada celeste que chega a uma superfície, depois de ter sofrido dispersão na atmosfera;
- Radiação global – representa a soma das parcelas da radiação direta e difusa.

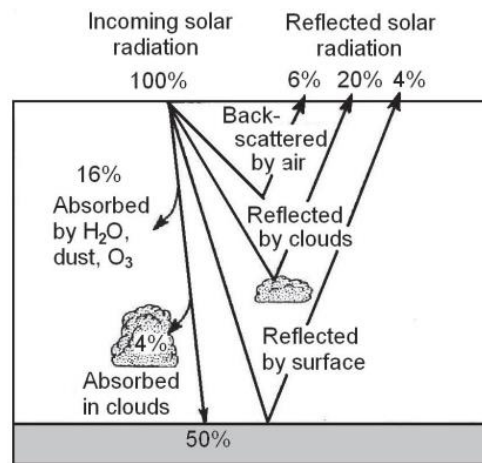


Figura 2.2. Distribuição da radiação na atmosfera terrestre [10].

### 2.1.3 Coeficiente de massa de ar

O coeficiente de massa de ar, AM (*Air Mass*), pode ser definido como o rácio entre a distância em que a radiação atravessa a atmosfera e a distância mínima possível que corresponde ao instante em que o Sol se encontra na vertical, fazendo um ângulo de 0° relativamente à normal ao observador. Assume-se para este efeito que a atmosfera terrestre é completamente homogênea e que não existem aerossóis ou vapor de água em suspensão. Considera-se que, quando o Sol se encontra no zénite do observador, a distância ótica toma o valor 1, sendo o coeficiente dado pela equação 2 onde  $\theta_z$  corresponde ao ângulo zenital [11]:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (2)$$

### 2.1.4 Distribuição espectral da radiação

Além da necessidade de se conhecer a constante solar, é necessário também conhecer a distribuição da radiação como função do comprimento de onda, denominado de espectro solar, representado na Figura 2.3 [6].

De acordo com o comprimento de onda, pode-se dividir o espectro em três zonas distintas. A zona de radiação ultravioleta corresponde à radiação com comprimento de onda inferior a 400 nm, onde estão contidos cerca de 10% da energia emitida pelo Sol. Na zona de radiação visível, com comprimentos de onda entre 400 e 700 nm, encontra-se cerca de 40% da energia e os restantes 50% encontram-se na zona de radiação infravermelha, com comprimentos de onda superior a 700 nm [6].

O espectro solar no exterior da atmosfera, conhecida como AM0, aproxima-se do espectro de um corpo negro a temperatura de 5800K. A integração da curva, para todos os comprimentos de onda resulta no valor de 1366 W/m<sup>2</sup>, correspondente à constante solar. Este espectro é assim conhecido devido à ausência ou “zero” atmosfera.

Depois de entrar na atmosfera terrestre, a radiação sofre os efeitos referidos anteriormente, resultando na absorção de certos comprimentos de onda, o que dá origem a um espectro de radiação à superfície, denominado de AM1.5, diferente do espectro de radiação extraterrestre. Pela integração do espectro AM1.5, para todos os comprimentos de onda, encontra-se o valor de aproximadamente 1000 W/m<sup>2</sup>, considerado como o valor *standard* à superfície terrestre, em condições de céu limpo. A Figura 2.3 ilustra os diferentes espectros de radiação solar.

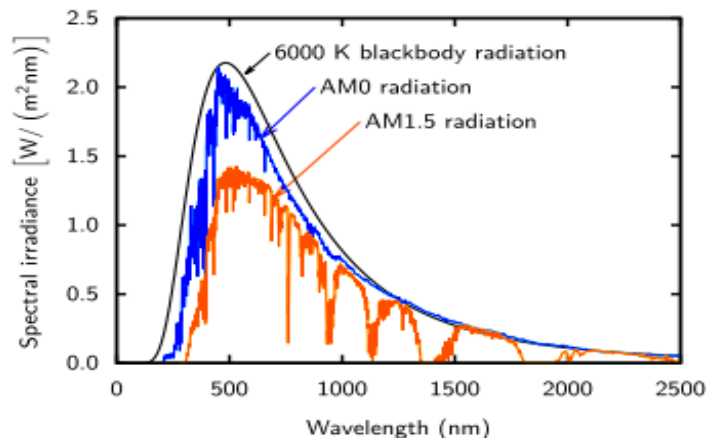


Figura 2.3. Espectro solar [11].

### 2.1.5 Medição da radiação solar

A medição da radiação solar à superfície terrestre é importante para estudos de meteorologia, climatologia e principalmente de aplicações solares.

O pireliómetro, ilustrado na Figura 2.4 (a), é um instrumento usado para a medição da componente direta da radiação solar, no plano de incidência. Isto significa que o instrumento aponta para o Sol em qualquer instante, através de um mecanismo próprio de seguimento. A radiação solar entra para o equipamento através de uma janela de cristal de quartzo e é direcionada para uma termopilha que converte calor em um sinal elétrico que pode ser guardado. É aplicado um fator de calibração quando se converte o sinal em mV para o fluxo radiante equivalente, medido em  $W/m^2$  [12].

A medição da radiação global é feita através de um piranómetro, ilustrado na Figura 2.4 (b). Este instrumento possui o mesmo princípio de funcionamento que um pireliómetro, diferenciando apenas no facto da superfície sensível deste sensor estar exposta a toda a radiação proveniente do Sol, contando com a radiação difusa e a refletida, num campo de visão de  $180^\circ$ . A superfície sensível consiste numa termopilha de multijunção, com uma junção quente e outra fria. A diferença de temperatura entre as duas junções é função do fluxo de radiação que chega à superfície sensível [12].

A radiação difusa também é medida através de um piranómetro, provido de um disco ou uma esfera que bloqueia a radiação direta, proveniente do Sol. O disco está a uma distância padrão de 0.3 m e faz com que apenas a radiação difusa do ambiente envolvente seja captada pelo piranómetro [12].

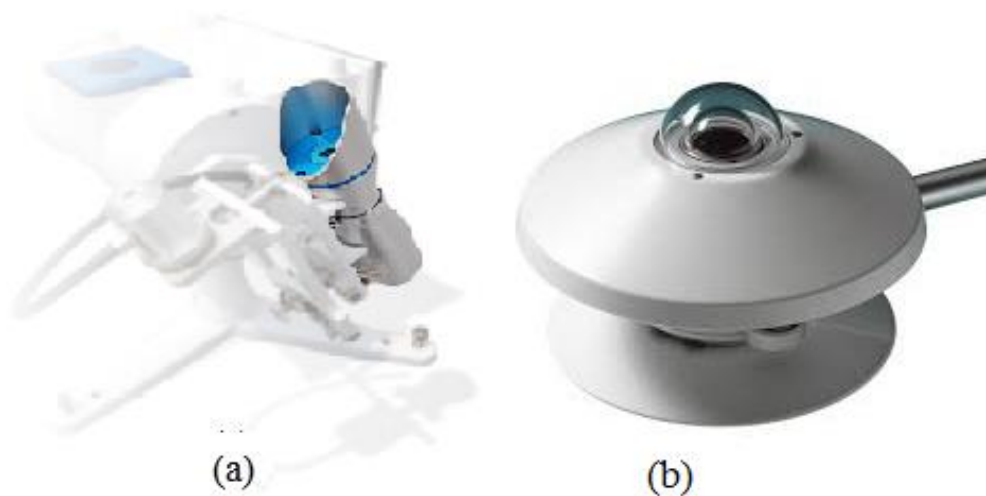


Figura 2.4. Equipamentos de medição da radiação solar. a) Pireliómetro; b) Piranómetro [13].

## 2.2 Relações astronômicas Terra-Sol

### 2.2.1 Sistema de coordenadas locais: latitude e longitude

Qualquer ponto na superfície da Terra pode ser especificado por duas coordenadas, a latitude ( $\phi$ ) e a longitude ( $\lambda$ ), representadas na Figura 2.5.

A latitude é definida como a distância angular medida ao longo de um meridiano, do equador a um ponto situado na superfície terrestre. Qualquer ponto na Terra situado acima da linha do equador possui latitude positiva, sendo o valor máximo de  $90^\circ$  e de forma inversa, qualquer local situado abaixo da linha do equador possui latitude negativa, com o mínimo de  $-90^\circ$ .

Por sua vez, a longitude é definida como a distância angular medida a partir do meridiano de referência (meridiano de Greenwich) para um ponto situado a Este ou a Oeste. Qualquer ponto situado a Oeste do meridiano de referência possui longitude positiva e qualquer ponto a Este possui longitude negativa.

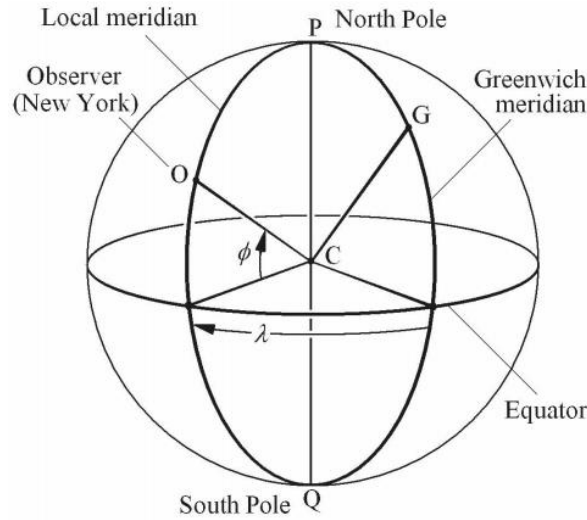


Figura 2.5. Latitude e Longitude [10].

### 2.2.2 Equação do tempo

Um dia solar corresponde ao intervalo de tempo em que o Sol completa um ciclo, em relação a um observador estacionário. Este ciclo não tem, necessariamente, a duração de 24 horas, variando ao longo de um ano devido à trajetória elíptica da Terra em torno do Sol e também pelo facto do eixo da Terra apresentar uma inclinação em relação ao plano da elíptica [14].

Assim, ao longo de um ano vê-se uma variação da duração do dia, podendo realizar um ciclo num tempo maior ou menor em relação ao ciclo perfeito de 24 horas (Figura 2.6). Essa discrepância, denominada de equação do tempo, pode ser quantificada pela equação 3:

$$E_t = (0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.032077 \sin \Gamma - 0.014615 \cos 2\Gamma - 0.04089 \sin 2\Gamma) \times 229.18 \quad (3)$$

onde  $\Gamma$  corresponde ao ângulo do dia dado na equação 4 e o multiplicador 229.18 converte a equação em minutos.

$$\Gamma = \frac{2\pi(N - 1)}{365} \quad (4)$$

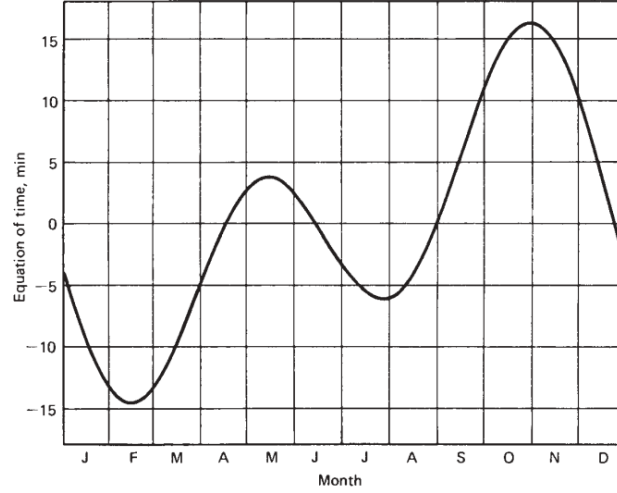


Figura 2.6. Variação da equação do tempo ao longo do ano [8].

### 2.2.3 Fator de correção do tempo

Muitos dos parâmetros meteorológicos como a radiação, velocidade do vento e a temperatura são medidos em termos de tempo de relógio local (TRL), embora para aplicações de energia solar seja necessário conhecê-los em termos de tempo local aparente (TLA) ou tempo solar verdadeiro (TSV). O tempo solar aparente é baseado no movimento aparente do Sol, em que o meio-dia solar corresponde ao instante em que o Sol atinge o ponto mais alto no céu, ou seja, cruza o meridiano de um observador situado na superfície terrestre [14].

Para a obtenção do tempo local aparente é necessário realizar duas correções ao tempo de relógio local. A primeira correção é devida a diferença entre a longitude local ( $\lambda_{LOC}$ ) e a longitude do meridiano de referência ( $\lambda_{SMT}$ ), conhecida como correção da longitude (CL) e que é dada pela equação 5 [14]:

$$CL = 4(\lambda_{SMT} - \lambda_{LOC}) \quad (5)$$

O fator 4 corresponde à conversão dos ângulos em graus para minutos, dado que o Sol se move  $1^\circ$  a cada 4 minutos. A correção da longitude é positiva se a longitude do local estiver a Este do meridiano de referência e negativa se estiver a Oeste do mesmo [14].

A segunda correção corresponde a adição da equação do tempo ao tempo de relógio local, sendo o tempo local aparente dado pela equação 6:

$$TLA = TRL + CL + E_t \quad (6)$$

### 2.2.4 Declinação solar

O eixo de rotação da Terra, denominado de eixo polar, está inclinado  $23.45^\circ$  em relação à normal ao plano da elíptica. Assim, a radiação incidente sofre uma variação diária devido a rotação da Terra em torno do seu eixo e uma variação sazonal devido à posição do eixo em relação ao Sol [14].

O mesmo acontece com o ângulo formado entre o plano equatorial e o plano da elíptica. No entanto, o ângulo formado pela linha que une o centro do Sol ao centro da Terra, denominado de declinação solar, varia constantemente. A declinação apresenta um valor de  $0^\circ$  nos equinócios de outono e primavera, um valor de  $23.45^\circ$  no solstício de verão e  $-23.45^\circ$  no solstício de inverno, como mostra a Figura 2.7.

De acordo com Spencer [14], a declinação pode ser calculada pela equação 7:

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma)(180/\pi) \quad (7)$$

Ou de forma mais simples, pode ser dada pela equação 8:

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360(284 + N)}{365}\right) \quad (8)$$

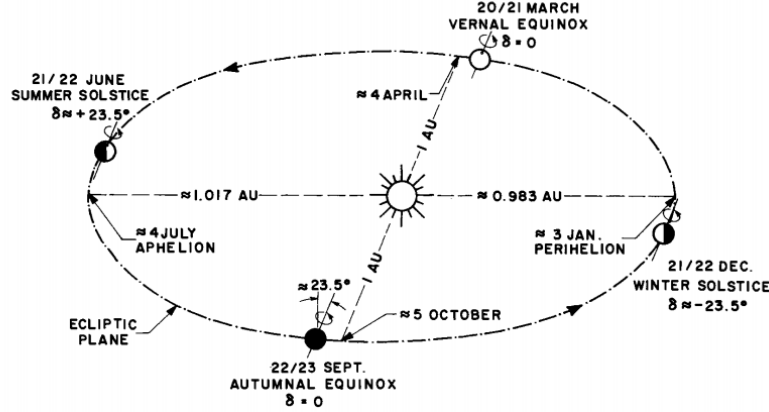


Figura 2.7. Variação declinação solar da Terra ao longo do ano [14].

### 2.2.5 Ângulo horário

O ângulo horário converte o tempo local aparente no ângulo correspondente ao movimento do Sol. Este ângulo é calculado pela equação 9:

$$\omega = 15(TLA - 12) \quad (9)$$

onde o fator 15 representa o facto de a Terra ter uma velocidade de rotação de 15° por hora. Este ângulo tem um valor negativo desde o nascer do Sol até antes do meio-dia solar e positivo depois desse ponto até o pôr-do-sol. Exatamente ao meio dia solar tem o valor nulo, que corresponde ao ponto em que o Sol atinge a maior altitude no céu [14].

### 2.2.6 Ângulo zenital

O ângulo zenital do Sol ( $\theta_z$ ) corresponde ao ângulo entre o zénite local ou a vertical e a linha que junta um observador a superfície terrestre e o Sol, como mostra a Figura 2.8 [14]. Este ângulo varia entre 0 e 90° e é dependente do dia, da hora e do local e matematicamente, pode ser expressa pela equação 10:

$$\theta_z = \text{acos}(\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega) \quad (10)$$

### 2.2.7 Altitude solar

A altitude solar ( $\alpha_s$ ), também conhecida como elevação solar, corresponde ao ângulo formado pelo horizonte celeste e pela linha que une um observador à superfície terrestre e o Sol. Pode-se ver ainda pela Figura 2.8 que a altitude solar é o ângulo complementar do zénite solar e é determinado pela equação 11 [14]:

$$\alpha_s = \text{asin}(\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega) \quad (11)$$

### 2.2.8 Azimute solar

O azimute solar ( $\gamma_s$ ) corresponde ao ângulo formado pelo plano do meridiano de um observador e o plano de projecção do zénite solar, como se pode ver pela Figura 2.8. Ao meio dia solar, este ângulo é nulo, o que significa que o Sol está exatamente acima do meridiano. Do nascer do Sol até exatamente antes do meio-dia solar é positivo e do meio-dia solar até o pôr-do-sol é negativo e matematicamente, o azimute solar é determinado pela equação 12 [14]:

$$\gamma_s = \text{acos}\left(\frac{\sin \alpha_s \times \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha_s \times \cos \phi}\right) \quad (12)$$



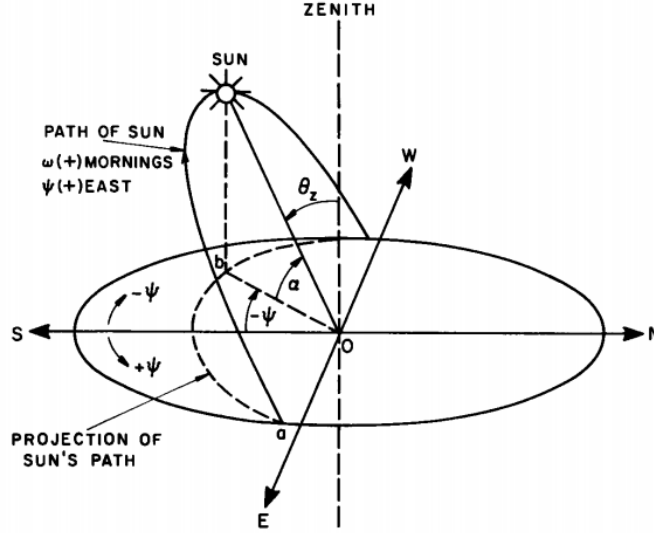


Figura 2.8. Representação do zênite, elevação e azimute solar [14].

### 2.2.9 Nascer e pôr-do-sol

O nascer e o pôr-do-sol podem ser definidos como sendo os instantes em que a altitude solar é nula [14]. Como resultado disso, pela equação 13 têm-se que:

$$\cos \omega = \left( \frac{-\sin \phi \times \sin \delta}{\cos \phi \times \cos \delta} \right) \quad (13)$$

Calcula-se então o ângulo horário correspondente pela equação 14:

$$\omega = \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (14)$$

Este ângulo é igual tanto para o nascer como para o pôr-do-sol, tendo apenas sinais contrários. Com o valor do ângulo horário pode-se calcular a hora do nascer e do pôr-do-sol, dada pelas equações 15 e 16, respetivamente [14]:

$$T_{ns} = 12 - \frac{\omega}{15} - (CL + E_t) \quad (15)$$

$$T_{ps} = 12 + \frac{\omega}{15} - (CL + E_t) \quad (16)$$

Assim sendo, a duração do dia será dada pela equação 17:

$$T_{dia} = T_{ps} - T_{ns} \quad (17)$$

Todas as relações anteriormente descritas são importantes quando se pretende realizar estudos de aplicações solares, especialmente para o seguimento solar. É necessário conhecer bem a geometria do Sol, calcular os ângulos como o azimute, a elevação solar e o azimute, que dependem do dia do ano, da hora e do local. Com estes dados é possível traçar diagramas polares com a trajetória do Sol para qualquer dia do ano. Para os dias mais próximos do verão, a trajetória do Sol é mais longa, os dias têm maior duração e o Sol atinge altitudes mais elevadas ao meio-dia solar [14].



### 3. Energia fotovoltaica – Estado da Arte

#### 3.1 O mercado da energia fotovoltaica

O mercado da energia fotovoltaica (PV) cresceu ao longo da última década a uma taxa muito elevada principalmente devido ao declínio do preço dos sistemas PV em cerca de 75%, o que contribuiu para uma maior competitividade em alguns países e ao surgimento de mercados emergentes. No ano de 2015 registou-se mundialmente 227 GW de potência de PV instalada, em que 23 países ultrapassaram a marca de 1 GW. A China passou a ser o país detentor da maior potência instalada, com cerca de 43,6 GW, ultrapassando a Alemanha que registou 39,7 GW. De acordo com os cenários estudados pela *SolarPower Europe* (EPIA), prevê-se cerca de 540 GW de capacidade total instalada em 2019 [15] [16].

Portugal é dos países do continente europeu com maior índice de insolação e consequentemente, maior potencial para a produção de eletricidade a partir de sistemas fotovoltaicos, como ilustra a Figura 3.1. De acordo com os dados da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), em 2006 haviam apenas 3MW de potência instalada de PV. Desde então a instalação de sistemas fotovoltaicos tem crescido, atingindo em 2015 um total de 442MW. Assim, as fontes fotovoltaicas têm contribuído de forma mais significativa para a demanda de energia, aumentando a contribuição de fontes renováveis, liderada pelas centrais eólicas e hídricas [17].

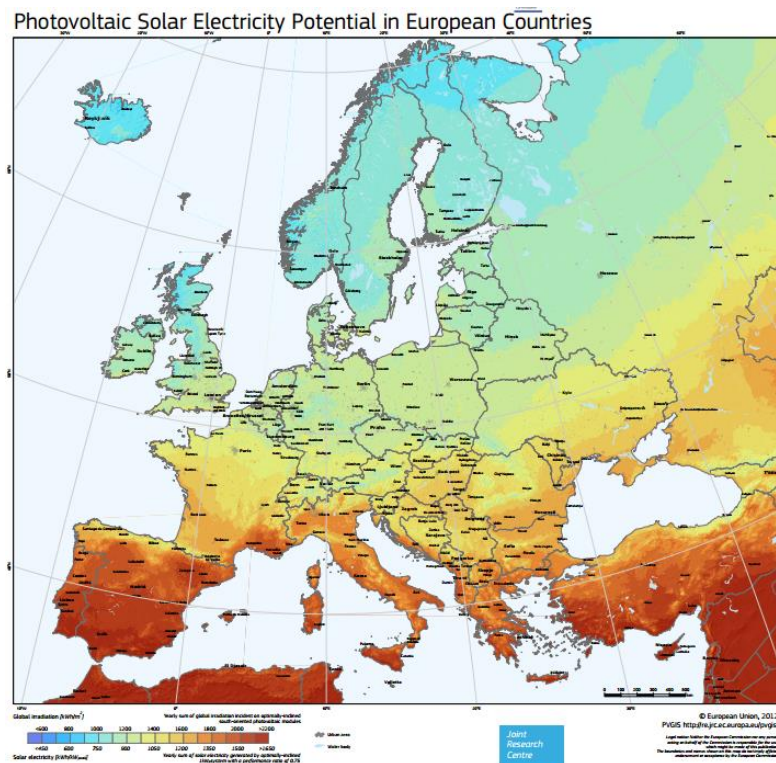


Figura 3.1. Potencial de produção de eletricidade solar na Europa [18].

#### 3.2 Sistemas fotovoltaicos

##### 3.2.1 Sistemas Autónomos

Os sistemas fotovoltaicos autónomos são encontrados essencialmente em locais remotos, onde não há penetração da energia elétrica proveniente da rede e onde não existem outras fontes de energia instaladas [19].

Nestes sistemas, pode ou não existir inversores, de acordo com o tipo de cargas elétricas existentes. Em alguns sistemas, a alimentação pode ser feita diretamente dos painéis, mas normalmente existe

armazenamento de energia em baterias. A Figura 3.2 mostra o esquema típico de um sistema autónomo. Existem ainda sistemas autónomos híbridos, em que a produção é feita recorrendo a outras fontes além do PV, como por exemplo pequenas turbinas eólicas ou geradores a *diesel* [19] [20].

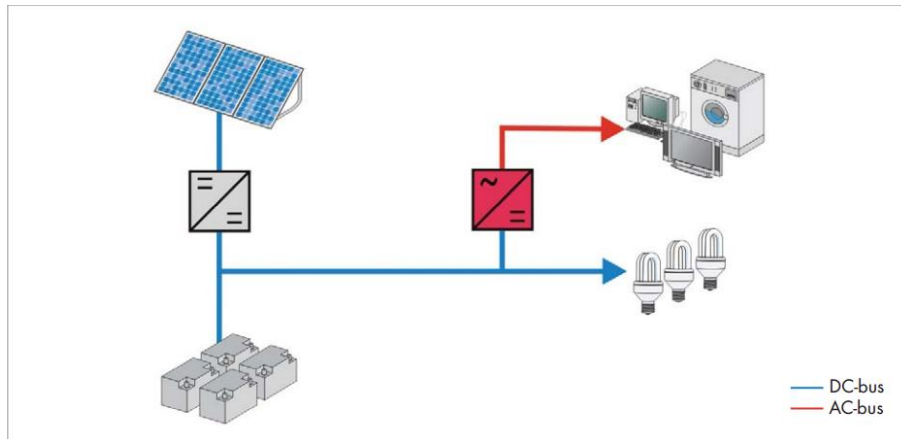


Figura 3.2. Esquema de um sistema fotovoltaico autónomo [20].

### 3.2.2 Sistemas ligados à rede

Os sistemas fotovoltaicos ligados à rede são normalmente encontrados em zonas urbanas. Nestes sistemas não há armazenamento de energia em baterias, o que significa que o excesso de eletricidade gerado é fornecido à rede elétrica. A rede atua como um sistema de armazenamento quando há excesso de energia produzida pelo sistema e como fonte de energia quando o sistema não produz energia suficiente para suprir a demanda [19].

Como mostra o esquema da Figura 3.3, as principais componentes que diferem estes tipos de sistemas dos autónomos é a existência do inversor e de contadores de produção da energia que é injetada na rede e da que é dela consumida [19] [21].

Além dos pequenos sistemas, existem também centrais fotovoltaicas de grandes dimensões, ligadas diretamente à rede de distribuição. Estes sistemas ajudam na descentralização das fontes de produção, aumentando a eficiência na distribuição da energia e minimizando as perdas que ocorrem devido a distância entre as fontes e os consumidores [19] [21].

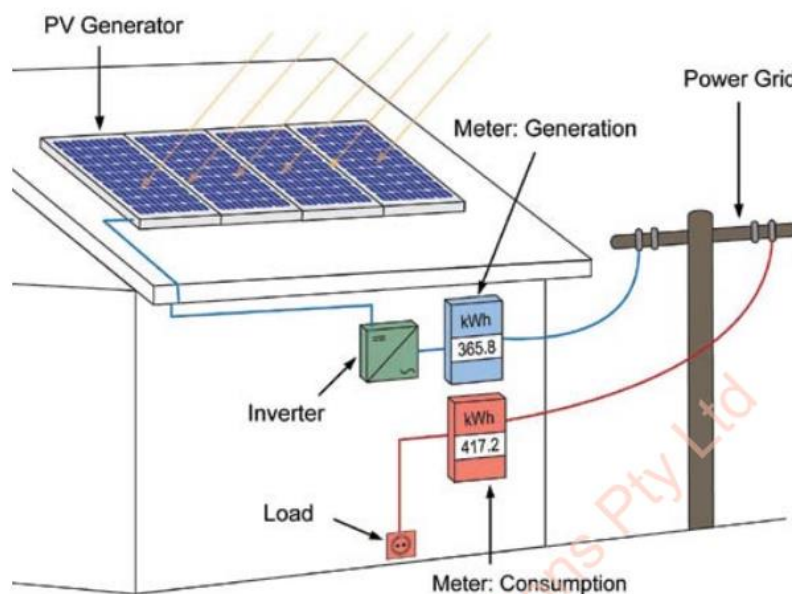


Figura 3.3. Esquema de um sistema fotovoltaico ligado à rede [19].

### **3.3 Componentes de um sistema fotovoltaico**

#### **3.3.1 Células fotovoltaicas**

Uma célula solar fotovoltaica consiste num dispositivo que converte a luz solar, como um fluxo de fótons, em eletricidade. Existem diferentes tipos de células usadas na tecnologia fotovoltaica, produzidas com materiais diferentes, em que as principais são as de silício cristalino (monocristalino e policristalino) e filmes finos (a-Si, CIGS, CdTe) [22] [23].

As células de silício cristalino são as mais usuais na tecnologia fotovoltaica, correspondendo a mais de 80% da produção mundial. Embora células baseadas nos outros materiais estejam em constante desenvolvimento e alguns já estejam no mercado, os módulos baseados nas células de silício dificilmente deixarão de ser os mais produzidos mundialmente, devido à sua fiabilidade, com tempos de vida entre os 20 e 25 anos e o processo de produção bem conhecido [22] [23].

A ligação entre células solares fotovoltaicas pode ser feita tanto em série como em paralelo. Quando se ligam duas ou mais células iguais em série, a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) do conjunto passa a ser a soma da tensão de todas as células e a corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) se mantém igual a corrente de uma única célula. De modo oposto, quando se ligam duas ou mais células em paralelo, a tensão de circuito aberto do conjunto se mantém igual à tensão de uma única célula e a corrente de curto-circuito passa a ser a soma das correntes de todas as células. Este princípio aplica-se ainda para um conjunto de módulos fotovoltaicos, sendo que um módulo é constituído por várias células ligadas entre si [22] [10].

Normalmente, o desempenho dos módulos PV é apresentado em condições STC (*Standard Test Conditions*) correspondente a  $1000 \text{ W/m}^2$  de irradiância, temperatura de  $25^\circ \text{C}$  e espectro solar AM1.5. Nestas condições, a potência máxima dos módulos é apresentada em Watt-pico (Wp) que pode não corresponder a potência máxima em ambiente real [24].

#### **3.3.2 Armazenamento**

O armazenamento de energia é um fator de extrema importância para os sistemas fotovoltaicos autónomos. Para que a utilização da energia proveniente do sistema fotovoltaico não esteja confinada apenas aos períodos em que há Sol, é necessário haver um sistema de armazenamento. Assim, independentemente da hora do dia ou da noite, garante-se que há eletricidade disponível para a utilização dos equipamentos ou eletrodomésticos ligados ao sistema fotovoltaico visto que o pico de consumo de energia normalmente não coincide com o pico de produção solar. As baterias representam a forma mais comum de armazenamento de energia nos sistemas fotovoltaicos, por serem uma tecnologia desenvolvida e relativamente mais barata [22].

#### **3.3.3 Controladores/ Reguladores de carga**

Os controladores ou reguladores de carga são utilizados para regular o fluxo de corrente dos módulos para as baterias e ainda das baterias para as cargas elétricas, principalmente nos sistemas solares autónomos. São equipamentos que podem ser programadas para prevenir a sobrecarga das baterias quando a produção excede o consumo e sobre-descarga quando o consumo é maior do que a produção. Os preços dos controladores são variáveis, dependendo das suas funcionalidades e da sua complexidade [22].

#### **3.3.4 Inversores DC/AC**

Para que se possa aproveitar a energia solar para a alimentação de equipamentos elétricos que funcionam em corrente alternada (AC), é necessário o uso de um inversor. Para os sistemas ligados à rede elétrica, o uso do inversor é obrigatório e para os autónomos, só é necessário caso existam equipamentos que funcionem em AC. Os inversores diferenciam entre si de acordo com a configuração do sistema em que são utilizados, em que nos que se ligam à rede elétrica, a corrente é proveniente diretamente dos módulos fotovoltaicos e devem fornecer a mesma tensão e frequência da rede, que na Europa são de 230V e 50Hz respetivamente, ao passo que nos sistemas autónomos a corrente pode vir do banco de baterias [22].

### 3.4 Sistemas estacionários e de seguimento

#### 3.4.1 Sistemas estacionários

Os sistemas fixos de média e elevada capacidade constituem a maior grande parte dos sistemas PV instalados mundialmente. São normalmente instalados usando uma orientação que depende das características geográficas e climáticas do local e do custo da instalação. A melhor configuração para a instalação de módulos fotovoltaicos fixos corresponde a orientação Sul e um ângulo de inclinação aproximadamente igual à latitude do lugar, para o hemisfério Norte [22] [25].

O aproveitamento da energia para os sistemas fixos é variável ao longo do dia e do ano, dependendo da radiação disponível para os módulos. Estes se aproximam do pico de produção nos instantes em que o ângulo de incidência dos raios solares é mínima, para um dia de céu limpo. Ao se afastar desse ponto, a produção do sistema também se afasta do seu máximo, dado que o ângulo de incidência é cada vez maior, diminuindo a área útil ou ativa dos módulos. Assim, a produção nos instantes próximos ao nascer e ao pôr-do-sol são mínimas, aumentando a medida em que o Sol está cada vez mais alto e se aproxima da orientação dos módulos [22] [25].

Para um determinado instante e localização, a posição do Sol pode ser descrito pela vetor  $\vec{v}_0$ , determinado pela equação 18 [26]:

$$\vec{v}_0 = \begin{pmatrix} \cos \gamma_s \cos \alpha_s \\ \sin \gamma_s \cos \alpha_s \\ \sin \alpha_s \end{pmatrix} \quad (18)$$

onde  $\gamma_s$  e  $\alpha_s$  correspondem ao azimuth e altitude solar, calculados pelas equações 11 e 12 respetivamente (secção 2.2). Por outro lado, a normal para um módulo PV com orientação ( $\psi$ ) e inclinação ( $\beta$ ) fixos é caracterizado pelo vetor  $\vec{n}$ , determinado pela equação 19 [26]:

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \\ \sin \psi \cos \left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \\ \sin \left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \end{pmatrix} \quad (19)$$

#### 3.4.2 Sistemas de seguimento solar

A produção de energia de um sistema solar depende da quantidade de radiação recebida pelo sistema e, devido ao movimento aparente do Sol em relação a um ponto fixo na Terra, a melhor forma de maximizar a produção é a realização do seguimento solar [22] [27].

A quantidade de radiação recebida varia com o ângulo que os raios solares fazem com o plano do sistema. O objetivo do seguimento solar consiste em aumentar a área efetiva dos módulos do sistema relativamente à incidência dos raios solares, de forma a maximizar a produção. Este aumento de produção aliado a uma possível redução do tamanho e do custo da energia aumentam a eficiência do sistema. O aumento da energia produzida está associado também a um custo adicional relativo à construção, instalação e manutenção das partes móveis e dos motores [27][26].

Em termos de modo de operação, os sistemas de seguimento solar são classificados em sistemas ativos e passivos. Nos sistemas de seguimento ativos, recorre-se normalmente a motores e sistemas eletrónicos no controlo do posicionamento dos módulos, o que leva a existência de um gasto de energia elétrica, além dos custos adicionais de operação e manutenção [27]. Em sentido contrário, os sistemas solares passivos recorrem principalmente a expansão térmica de fluídos [28], de ligas metálicas [29] ou cristais elásticos para a realização do seguimento solar, sem qualquer gasto de energia elétrica. O protótipo SEG SOL, instalado no Campus Solar da FCUL, constitui um exemplo da tecnologia de seguimento solar passivo recorrendo a cristais elásticos [30].

O ganho de um sistema de seguimento solar ativo em relação a um sistema fixo depende da configuração, visto que existem diferentes tipos de seguidores, como se pode observar na Figura 3.4.

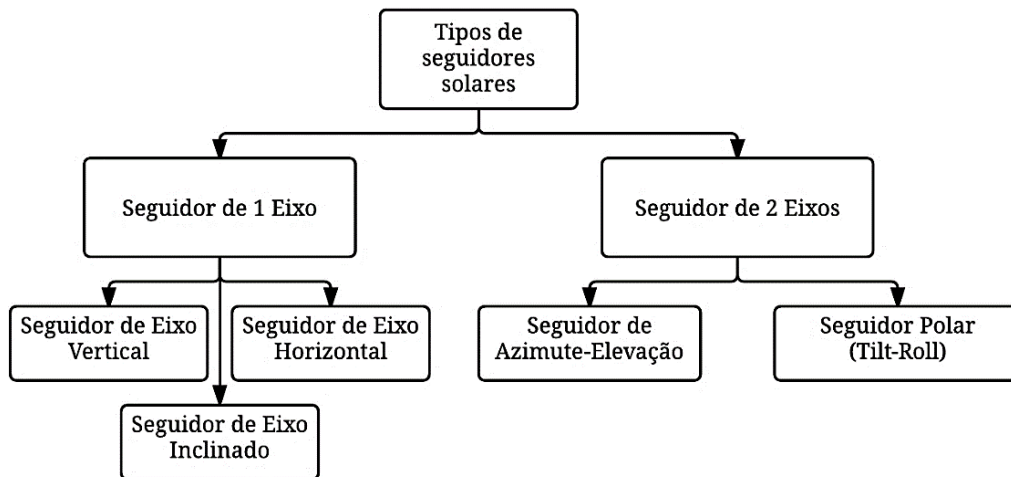


Figura 3.4. Tipos de Seguidores solares existentes [27].

### Seguimento solar de 1 Eixo

Os tipos de seguidor solar de um eixo, representados na Figura 3.4 contêm apenas um grau de liberdade de movimento, ou seja, apenas um eixo rotacional. Conforme as necessidades do utilizador, as várias configurações dos seguidores de um eixo permitem a realização do seguimento solar diário (azimutal) ou sazonal (elevação) [22].

Nos seguidores de eixo horizontal, o eixo de rotação é paralelo à superfície da Terra, podendo estar orientada nas direções Norte-Sul ou Este-Oeste. Quando o eixo de rotação está orientado na direção Norte-Sul, o seguidor segue o azimute solar e pelo contrário, se o eixo estiver orientado na direção Este-Oeste, o seguidor acompanha a altitude solar. Na Figura 3.5 (a) ilustra-se um seguidor solar com esta configuração [22].

Para os seguidores de eixo vertical, também conhecidos como seguidores azimutais, o eixo de rotação é perpendicular à superfície terrestre e o principal objetivo é acompanhar o Sol de Este para Oeste no seu curso diário, com uma inclinação fixa dos painéis, como ilustrado na Figura 3.5 (b). Em latitudes mais elevadas, este tipo de seguidor apresenta uma eficiência mais elevada do que o seguidor de eixo horizontal [22].

Os seguidores de eixo inclinado representam o caso intermédio entre os seguidores de eixo horizontal e os de eixo vertical, como se ilustra na Figura 3.5 (c). Nesta configuração, o eixo de rotação encontra-se orientada na direção Norte-Sul, com um determinado ângulo de inclinação, realizando assim o seguimento diário do Sol na direção Este-Oeste. Este seguidor é também conhecido como seguidor polar, para o caso específico em que o ângulo de inclinação é igual a latitude do lugar em que este se encontra instalado [22].

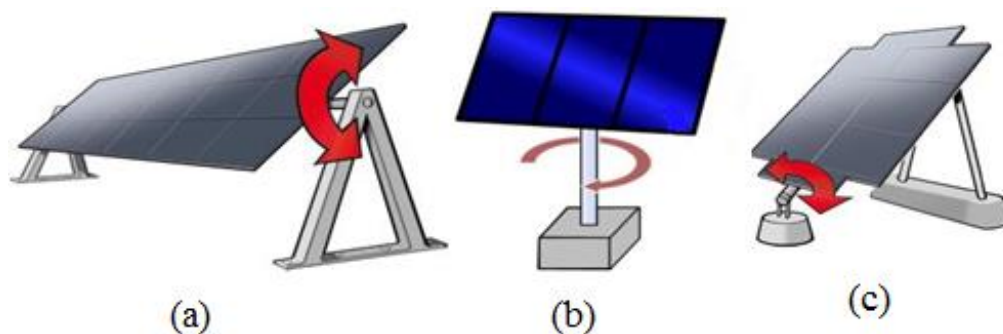


Figura 3.5. Seguidores de 1 eixo. a) Eixo horizontal; b) Eixo vertical; c) Eixo inclinado [31].

Dependendo da configuração, o ganho de energia produzida por um sistema de seguimento de um eixo varia entre 20 e 30% em relação a um sistema fixo, em termos anuais [32].



## Seguimento solar de 2 Eixos

Os sistemas de seguimento solar de dois eixos possuem dois graus de liberdade, tendo a capacidade de seguir o Sol no plano horizontal e no plano vertical. Os tipos de seguidores de dois eixos representados na Figura 3.6 diferem pela configuração dos eixos de rotação, que são tipicamente normais, um em relação ao outro. O eixo que está fixo em relação ao solo é considerado o eixo primário e o que está referenciado ao eixo primário é considerado o eixo secundário, onde os módulos são normalmente afixados [22].

Nos seguidores do tipo azimute-elevação, os coletores devem ser livres para rodar ao longo dos dois eixos. O eixo primário ou eixo azimutal deve ser paralelo ao eixo do zénite e o eixo secundário ou eixo de elevação é sempre ortogonal ao eixo azimutal e logo, paralelo à superfície. Este tipo de seguidor encontra-se representado na Figura 3.6 (a) [22].

Alternativamente, os seguidores polares adotam uma configuração em que os coletores seguem o Sol diariamente no eixo azimutal e a mudança no ângulo de inclinação devido a variação anual da trajetória do Sol. Assim, neste tipo de seguidores, um dos eixos de rotação está alinhado paralelamente ao eixo polar da Terra, formando um ângulo de inclinação em relação ao horizonte, igual a latitude do lugar e o outro eixo de rotação é perpendicular ao eixo polar. O ângulo de seguimento no primeiro eixo é igual ao ângulo horário do Sol e o ângulo de seguimento no eixo perpendicular é dependente do ângulo de declinação da Terra. A vantagem deste tipo de seguimento é a facilidade do desenho do sistema de controlo, dado que a velocidade do seguimento é praticamente constante, com o valor de cerca de 15 graus por hora. Na Figura 3.6 (b) vê-se um exemplo desta configuração [22].

De acordo com as equações 18 e 19, o posicionamento de um seguidor de dois eixos é determinado substituindo a orientação de um módulo fixo pelo azimute solar ( $\psi = \gamma_s$ ) e a inclinação pela altitude solar ( $\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha_s$ ) [26].

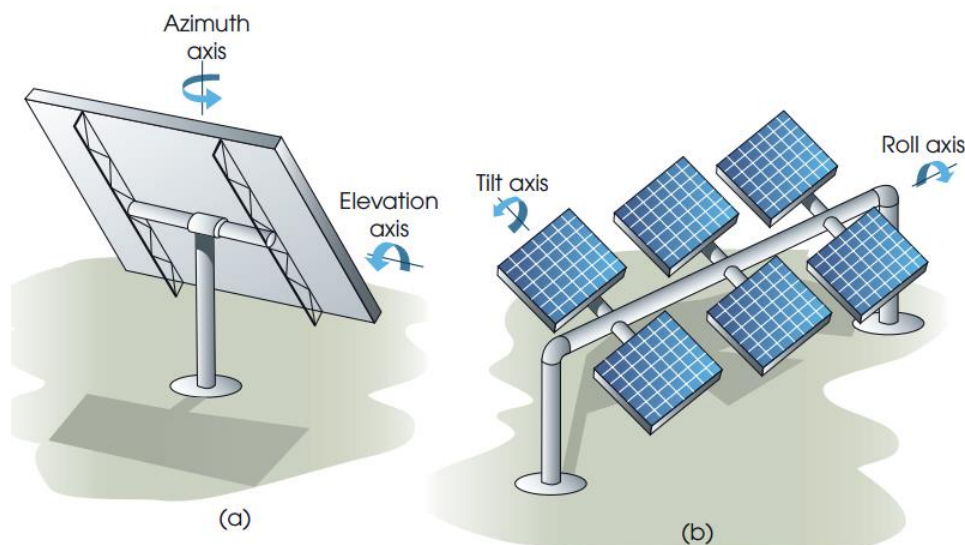


Figura 3.6. Seguidores de dois eixos. a) Seguidor de azimute-altitude; b) Seguidor polar [22].

Dependendo do local e do período sazonal, nos dias de céu limpo um sistema de seguimento solar de dois eixos pode produzir até 50% de energia em relação a um sistema fixo, em termos médios. Devido a variação da disponibilidade da radiação solar, verifica-se uma variação desse valor [25] [33].

O consumo específico de energia dos sistemas depende da configuração dos mesmos e está diretamente ligado a precisão com que o seguimento é realizado [32]. Como exemplo tem-se um seguidor de dois eixos da WS Energia que, instalado em Lisboa, espera-se uma produção anual de 1870 kWh/kWp e um consumo anual de cerca de 10 kWh, valor que corresponde a cerca de 0.5% da produção estimada, ou seja, por cada kWh de energia consumida, produz-se 187 kWh [34] [35].



### Concentradores solares fotovoltaicos

Os concentradores fotovoltaicos têm sido muito estudados nos últimos anos. Acrescentando componentes óticos aos sistemas, como as lentes e os espelhos, aumenta-se a quantidade de radiação recebida por unidade de área, reduzindo consideravelmente a área das células solares. Ainda assim, a redução da área das células deve ser balanceada com o custo adicional dos sistemas óticos, do sistema de seguimento e ainda com a perda da componente difusa da radiação. Consequentemente, o mecanismo de controlo do seguimento é mais complexo e preciso do que os sistemas sem concentração, de forma a poder aproveitar o máximo da radiação direta do Sol [22].

Existem várias tecnologias de concentradores solares, divididas em três categorias: baixa, média e alta concentração. A diferença entre estes tipos de concentradores reside principalmente no rácio de concentração da radiação solar, que é menor nos sistemas de baixa concentração e maior nos sistemas de alta concentração. Nos sistemas de média e alta concentração é ainda necessário a implementação de um sistema de refrigeração, dado que atingem temperaturas elevadas [22].

Na Figura 3.7 encontra-se representado um concentrador solar fotovoltaico recorrendo a um conjunto de lentes.



Figura 3.7. Concentrador fotovoltaico [22].

### 3.5 Métodos de seguimento solar

Com o avanço da tecnologia computacional e dos sistemas de controlo baseado em microcontroladores e microprocessadores, têm sido desenvolvidos vários métodos de seguimento solar, desenhados para maximizar a eficiência dos sistemas. Os sistemas de seguimento são classificados pelo modo de operação como sendo de ciclo fechado (*closed-loop*) ou de ciclo aberto (*open-loop*) [33] [36].

Os sistemas de seguimento de ciclo fechado são baseados em princípios de controlo de *feedback*, em que diferentes variáveis são introduzidas num controlador a partir de sensores que detetam parâmetros relevantes determinados pela posição Sol. Este controlador manipula estas entradas e produz uma resposta, sendo assim considerado uma solução baseada em sensores. Nestes sistemas são utilizados sensores como os foto-díodos, foto-transístores ou resistências dependentes de luz (LDR) que produzem um sinal, de acordo com a quantidade de radiação que recebem. Recentemente tem sido usado também o processamento de imagem, que usa a imagem do disco solar como variável de entrada [33] [36].

Por outro lado, os sistemas em ciclo aberto têm como princípio o uso de modelos geométricos da radiação solar, introduzidos em controladores que calculam a posição do Sol num dado instante e este resultado é utilizado como variável de entrada do sistema. Assim, este tipo de sistemas não utiliza nenhum tipo de *feedback* além do estado atual do sistema, sendo baseado apenas no algoritmo de posição do Sol. Como não observa a resposta do processo de controlo, este tipo de sistema não consegue corrigir possíveis erros e distúrbios que podem ocorrer no processo de seguimento. O erro

mais relevante nestes tipos de sistema é devido ao mau funcionamento dos relógios internos que fornecem dos dados de calendário para o cálculo da posição do Sol [33] [36].

A combinação dos métodos anteriores dá origem a um sistema híbrido que resulta num processo de seguimento mais preciso, com a minimização dos erros. A hibridização dos sistemas é importante nos dias em que há nebulosidade, em que a introdução de erros por parte dos sensores de radiação podem ser corrigidos pelo algoritmo baseado na geometria do Sol, desde que este também não apresente erros [33] [36].

Muitos seguidores solares realizam seguimento independentemente das condições do céu usando programas de cálculo da posição astronómica do Sol. Porém, em dias de muita nebulosidade, o posicionamento dos módulos deve sofrer alterações, principalmente para os sistemas de seguimento de dois eixos [25].

Um sistema de seguimento solar biaxial é mais efetivo na colheita de energia solar para a radiação direta (dias sem nuvens) já que mantem o ângulo entre os raios solares e a normal dos módulos em  $0^\circ$ . Nos dias de céu limpo 85 a 90% da energia solar é devido a componente direta da radiação, enquanto os outros 10 a 15% provêm da componente difusa. Em dias de céu nublado, quase toda a energia solar é difusa. A sua distribuição não é uniforme como a radiação direta, logo o seguimento solar nestes dias não aumenta a produção de energia. Para estes dias, a melhor configuração é o posicionamento horizontal, ou seja, é necessário igualar a normal dos módulos ao zénite local. Esta configuração resulta num aumento significativo da irradiância proveniente do céu, em detrimento do posicionamento da estrutura em direção ao Sol obstruído. É conseguido acrescentando mais *software* e *hardware* aos métodos dos sistemas de seguimento de dois eixos convencionais, de modo a extrair a máxima energia dos módulos solares seguindo o Sol em dias de céu limpo mas, orientando-os horizontalmente nos dias de céu nublado ou durante curtos períodos de nebulosidade [25].

## 4. Desenvolvimento do protótipo de seguimento solar

O presente capítulo tem por objetivo explicar a metodologia utilizada no desenvolvimento do sistema de controlo do seguimento solar. Em primeiro lugar é dado a conhecer todos os componentes do sistema anterior à intervenção realizada, como os módulos solares fotovoltaicos, os atuadores usados para a execução do seguimento, o sistema eletrónico, o sistema de monitorização, entre outros. Posteriormente é apresentada a solução implementada, com as devidas alterações realizadas no sistema, como a introdução de microcontroladores e sensores. Por fim, apresenta-se a monitorização do seguimento, da produção e do consumo do sistema, após as alterações.

### 4.1 Caracterização do sistema

O sistema existente é um seguidor solar de dois eixos, da marca WS Energia, instalado no Laboratório Solar do Centro de Sistemas Sustentáveis de Energia da FCUL. Este sistema foi instalado no mês de outubro de 2012, mas não se encontrava a funcionar devido a vários problemas.

Este sistema era inicialmente composto por uma *string* de 6 módulos ligados em paralelo como mostra a Figura 4.1-A. Cada módulo possui uma potência nominal de  $210 W_p$ , resultando numa potência total instalada de  $1260 W_p$ . Possui dois atuadores lineares responsáveis pelo seguimento solar e que são controlados por uma placa de circuitos eletrónicos criada pela WS Energia [35].

#### 4.1.1 Módulos fotovoltaicos

As células solares SANYO HIT que constituem os módulos do sistema são produzidas a partir de *wafers* muito finos de silício monocristalino, que estão entre camadas de silício amorfo ultra finos. Esta configuração confere um bom desempenho a estas células, com eficiências na ordem dos 19 %. Os módulos constituintes do sistema, do modelo HIP-210NKHE1, possuem as características apresentadas na Tabela 4.1 [35].

Tabela 4.1. Características dos módulos fotovoltaicos do sistema [35].

<b>Potência máxima (<math>W_p</math>)</b>	$P_{MAX}$	210
<b>Tensão MPP (V)</b>	$V_{MPP}$	41.3
<b>Corrente MPP (A)</b>	$I_{MPP}$	5.09
<b>Tensão de Circuito Aberto (V)</b>	$V_{OC}$	50.9
<b>Corrente de Curto-Circuito (A)</b>	$I_{SC}$	5.57
<b>Eficiência (%)</b>	$\eta$	16.7
<b>Área do Módulo (<math>m^2</math>)</b>	A	1.26
<b>Tecnologia</b>	-	Monocristalino

#### 4.1.2 Atuadores lineares

O seguimento solar é realizado através de dois atuadores lineares, um para cada eixo, afixados na estrutura que contém os módulos fotovoltaicos, ilustrado na Figura 4.1-B. Para o eixo horizontal, responsável pelo seguimento azimutal, o atuador possui uma capacidade de extensão de cerca de 90 cm e para o eixo vertical, responsável pela variação da elevação, conta-se com um atuador com uma extensão total de 61 cm. Os dois actuadores são compostos por motores DC, que podem ser alimentados numa gama de tensões entre os 20 e os 36V e possuem um consumo máximo de corrente de aproximadamente 2A [37].

Os atuadores possuem um sistema de rodas dentadas no seu interior, responsáveis pela desmultiplicação do movimento rotacional dos motores e pela transformação no movimento linear do braço do atuador, através de parafusos sem fim.

Estes braços mecânicos possuem ainda no interior um circuito constituído por dois interruptores de fim de curso, um para cada extremo do atuador, de forma a garantir a segurança do sistema. Este circuito, ilustrado na Figura 4.2, está montado numa placa que serve de tampa para o sistema de transmissão mencionado anteriormente. Existe ainda uma pequena peça montada num parafuso sem

fim, responsável pela ativação dos interruptores de fim de curso e ainda uma pequena roda dentada, instalada nesse mesmo parafuso, que roda quando o veio do atuador entra em movimento, fazendo mover a peça linearmente, até entrar em contacto com os interruptores. Mas como se pode ver não há ligação entre o veio do braço mecânico e o parafuso sem fim, pelo que este nunca entra em movimento, fazendo com que os interruptores nunca sejam ativados. Isso constitui um problema que pode pôr em causa a segurança do sistema dado que a não ativação dos interruptores de fim de curso não permite conhecer os limites de extensão máximos dos braços mecânicos, fazendo com que os motores estejam sempre em esforço quanto se atinge os pontos extremos e consumam muita energia de forma desnecessária.

Pela Figura 4.2 pode-se ainda constatar a existência de um pequeno sensor instalado próximo do veio do braço mecânico. Este sensor, denominado de *Reed Switch*, funciona como um interruptor que é ativado magneticamente por aproximação de um ímã. Este mecanismo permite conhecer a posição atual do braço mecânico, através da contagem de pulsos ou sinais emitidos pelo sensor. Também se verifica que não se encontra instalado nenhum ímã na extremidade do veio do braço mecânico, logo o sensor nunca é ativado. Assim sendo, não há forma de conhecer a posição do braço mecânico num dado instante, o que constitui um constrangimento para o sistema.



Figura 4.1. A- Sistema de seguimento solar de dois eixos; B- Atuadores lineares responsáveis pelo seguimento.

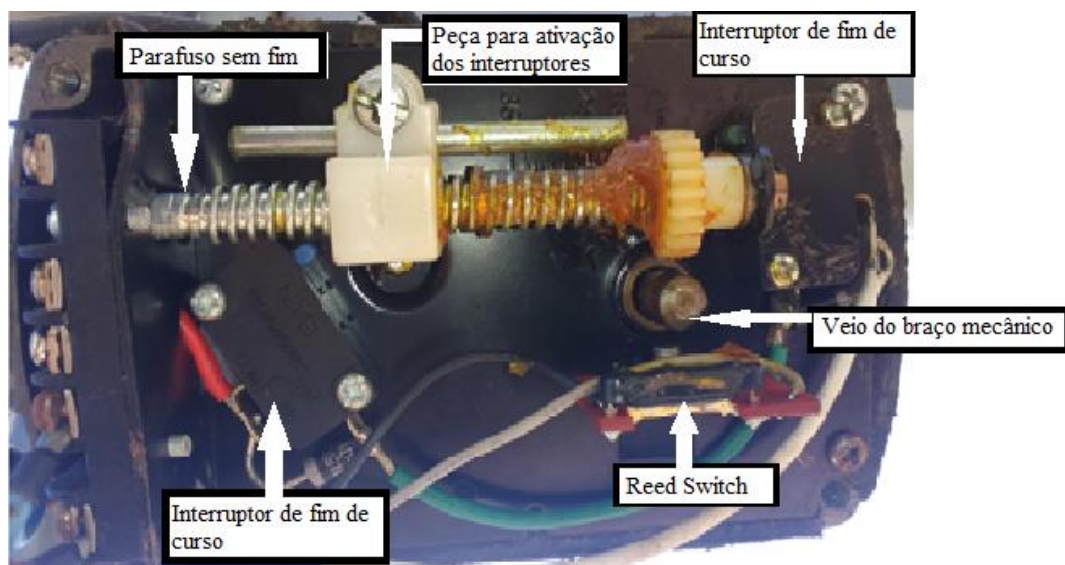


Figura 4.2. Interruptores de fim de curso e outros componentes instalados no atuador.



### 4.1.3 Sistema de controlo robótico

O sistema de controlo robótico é o *SunGravityControl*, desenvolvido pela WS Energia, ilustrado na Figura 4.3. Consiste numa placa de controlo e posicionamento dos atuadores lineares, de acordo com a posição do Sol. Utiliza um relógio interno e as coordenadas locais e conta ainda com um acelerómetro e um sensor de gravidade. Possui uma antena de comunicação GSM e ainda várias portas de comunicação, onde podem ser ligados sensores de leitura da velocidade do vento, temperatura e radiação. Possui também um banco de condensadores para a alimentação dos motores e de outras componentes existentes na placa, caso falte energia da rede elétrica [35].

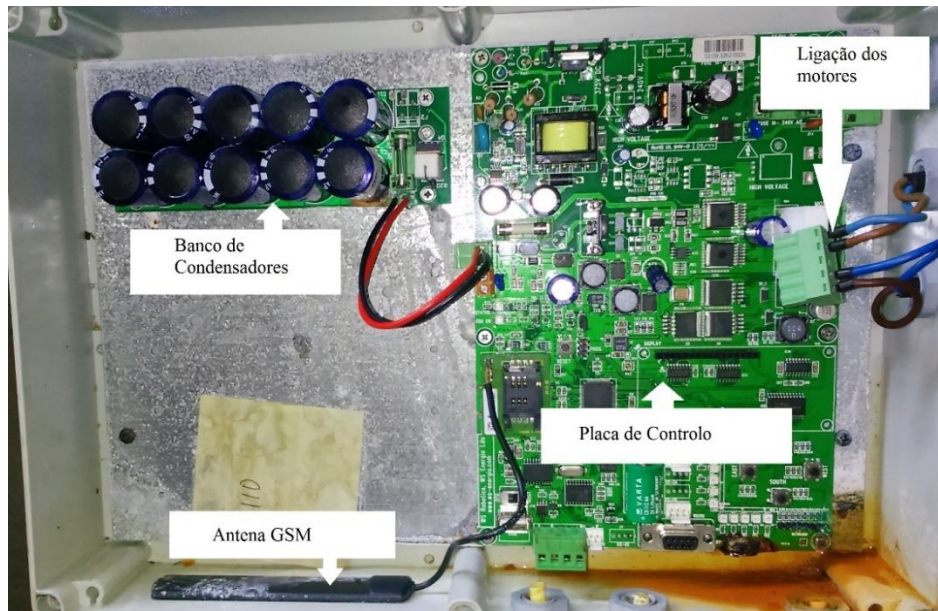


Figura 4.3. Caixa de controlo SunGravity utilizada pela WS Energia.

### 4.1.4 Inversor

O sistema inclui um inversor da marca SMA *Sunny Boy*, modelo SB 1100 LV, ilustrado na Figura 4.4. Este inversor está otimizado para baixas tensões de entrada (entre 21 e 60 V), pode receber correntes máximas na ordem dos 60 A e a potência máxima de entrada tem o valor de 1240 W. Como *output*, a máxima potência é de 1100 W e 5A de corrente, sendo a sua eficiência de cerca de 92%. Possui um sistema de diagnóstico e comunicação via rádio ou internet, onde se pode examinar o comportamento e receber dados de produção do sistema instalado [38].



Figura 4.4. Inversor Sunny Boy utilizado no sistema.

#### 4.1.5 Sistema de Comunicação

O inversor do sistema está ligado a uma plataforma de comunicação, a *Sunny WebBox*, ilustrado na Figura 4.5, para onde envia dados do sistema. Este está ligado a um *router*, sendo assim possível aceder aos dados numa plataforma *online*.

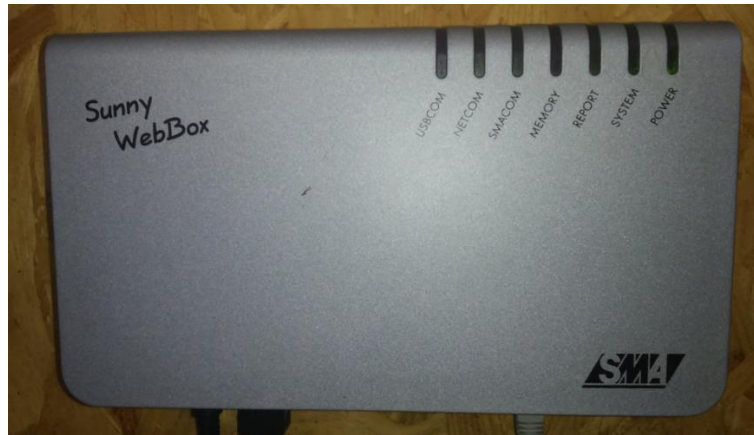


Figura 4.5. Sunny WebBox.

A plataforma *online* permite consultar dados como a potência instantânea do sistema, a energia produzida durante um determinado dia, a receita gerada dessa mesma produção, as emissões de CO<sub>2</sub> evitadas, a tensão de entrada no inversor, o rendimento instantâneo, o estado da comunicação, entre outros aspetos, sendo assim possível monitorizar remotamente o sistema em cada instante. Mostra ainda os gráficos de produção dos dias em que o sistema está ligado, podendo assim comparar dados diários, mensais ou anuais. Na Figura 4.6 ilustra-se um exemplo de como parte da informação é disponibilizada.



Figura 4.6. Informações disponibilizadas pelo sistema de comunicação e envio de dados.

#### 4.1.6 Esquema elétrico da instalação

O sistema de seguimento em estudo neste projeto está ligado a outros dois sistemas existentes no local. Como se ilustra na Figura 4.7, existe um sistema de seguimento de baixa concentração denominada de *DoubleSun*, com uma potência instalada total instalada de 570W, constituído por três módulos de 190W cada, ligados em série. Existe ainda o sistema convencional fixo, com uma potência instalada de 630W, proveniente de três módulos de 210W, também ligados em série. Cada um destes sistemas possui um inversor individual e uma caixa de proteção com disjuntores de 20A e

interruptores de 25A. Mais a frente, estes três sistemas juntam-se numa outra caixa, que está ligado a um contador de energia elétrica e esta por sua vez, está ligada a um ramal da rede elétrica, permitindo aos responsáveis do Campus monitorizar a energia produzida. Existe ainda um contador ligado ao ramal, utilizado para a monitorização da energia, por parte dos responsáveis da rede elétrica [35].

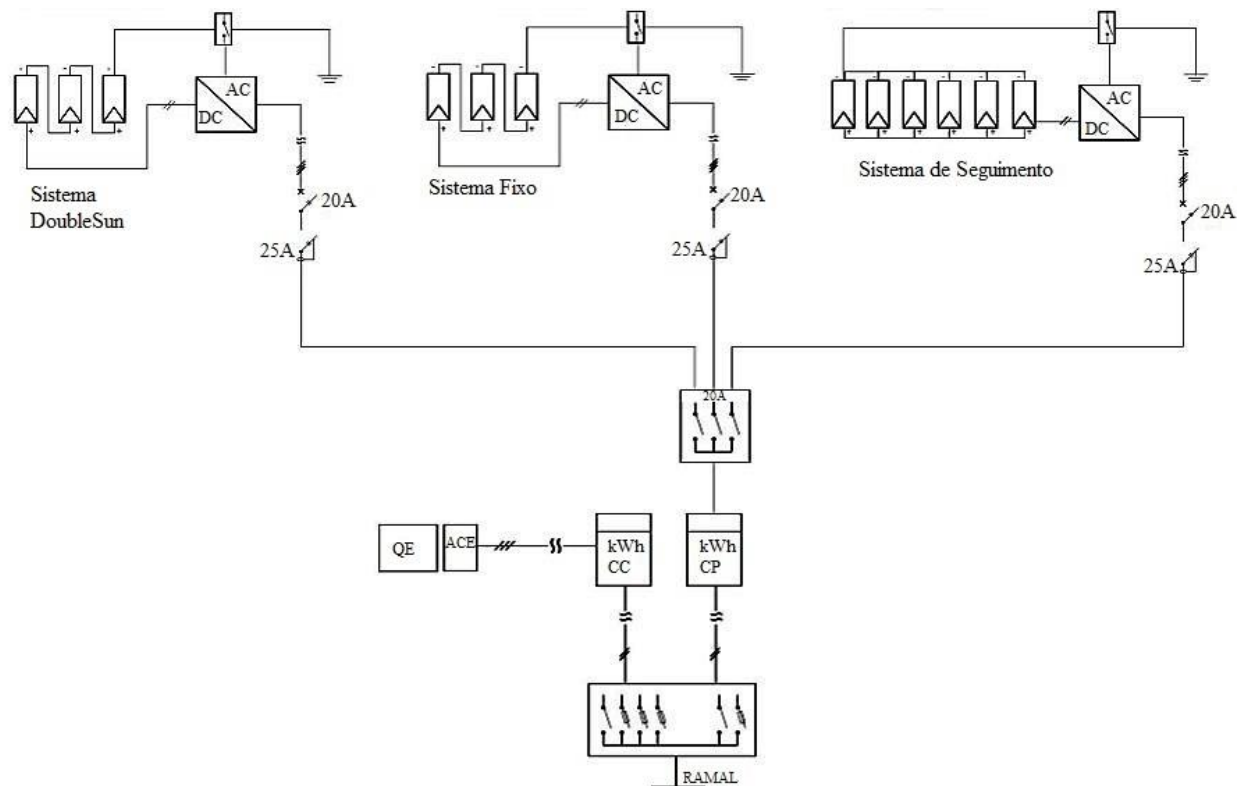


Figura 4.7. Esquema elétrico da instalação [35].

## 4.2 Implementação da solução alternativa

Como descrito anteriormente, o sistema instalado possui alguns problemas que impossibilitam o seu funcionamento da forma mais correta. Como principais problemas sublinha-se a ausência de sensores acoplados ao sistema de controlo robótico, a ausência de ligação ou ativação dos interruptores de fim de curso dos atuadores lineares e dos sensores magnéticos, sendo desta forma impossível conhecer a posição dos braços mecânicos num dado instante.

Pretende-se implementar um novo sistema de controlo de seguimento, de forma a melhorar o funcionamento do equipamento. Será implementado um novo algoritmo de seguimento solar, recorrendo a uma plataforma de prototipagem eletrónica, o *Arduino*. Este equipamento, para além de constituir uma solução extremamente económica, permite, com auxílio de outros componentes, controlar e testar diversos parâmetros do sistema de seguimento.

Após a instalação do sistema de controlo implementado, realiza-se uma campanha de obtenção dos dados relevantes para a avaliação do desempenho do sistema, tais como os ângulos medidos nos eixos, a produção e o consumo de energia elétrica, de forma a poder validar a metodologia utilizada.

### 4.2.1 Sistema de Controlo

Para a realização do seguimento, é necessário ter em conta vários componentes, que em funcionamento conjunto, permitem alcançar esse objetivo. O sistema que se pretende desenvolver é constituído por seis partes principais, como se ilustra na Figura 4.8.

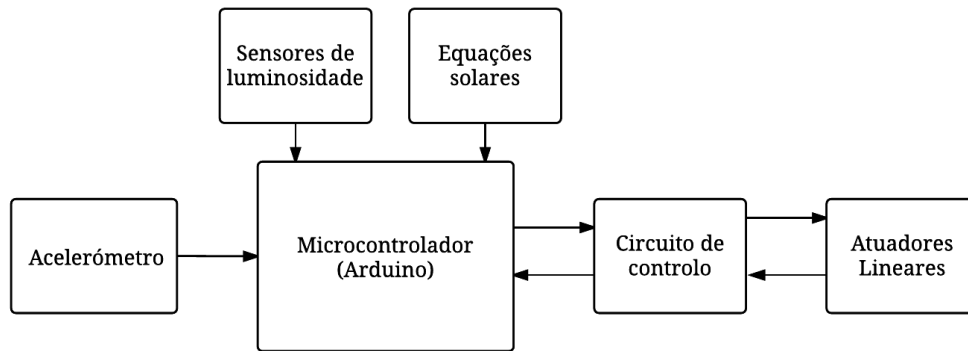


Figura 4.8. Sistema de controlo do seguimento.

Como principal componente tem-se um microcontrolador, neste caso o Arduino, que contém o algoritmo responsável pelo controlo dos outros componentes do seguimento. Este recebe dados de *input* de sensores de luminosidade, realiza os cálculos necessários para determinar a posição do Sol num dado instante e com isto, atua no circuito de controlo dos motores dos atuadores lineares, de onde é possível também receber dados de posicionamento. Realiza ainda a leitura dos ângulos de cada eixo, a partir de um acelerómetro digital. De referir ainda que é necessário um dispositivo de aquisição de dados, pelo que o sistema conta ainda com um *datalogger* próprio para o efeito.

Em seguida, será dada a conhecer de forma detalhada, cada componente deste sistema, o seu funcionamento e a forma como os vários componentes se interligam entre si.

## 4.2.2 Microcontroladores

Os microcontroladores são pequenos computadores integrados em *chips* que contêm um processador, periféricos programáveis de entrada e saída e memória interna. Integram na sua estrutura componentes como memória de leitura e escrita para armazenamento de dados e programas, conversores analógico/digital e digital/analogico, entre outros elementos. Encontram-se normalmente incorporados em outros dispositivos, utilizados para controlos diversos, como a automação, controlo de periféricos, motores, sistemas de vigilância, entre outras aplicações. São geralmente programadas através de computadores, de onde se faz a transferência de dados e funções para o microcontrolador [39].

Para o projeto em questão, optou-se por utilizar o Arduino como elemento de controlo do sistema dado que o objetivo é que o projeto seja simples, funcional e financeiramente viável, o que o torna ideal para o mesmo.

### Arduino Uno

O Arduino Uno, representada na Figura 4.9, é uma plataforma de prototipagem eletrónica baseada no microcontrolador ATmega328. Este dispositivo contém as características especificadas na Tabela 4.2 [40].

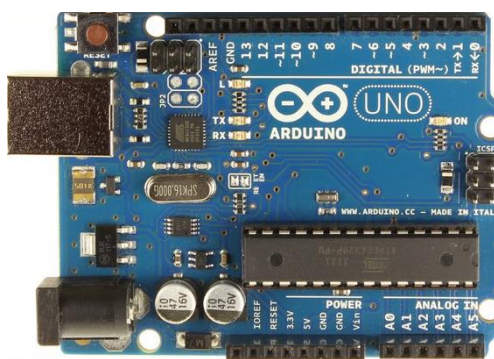


Figura 4.9. Arduino UNO [40].



O Arduino pode ser alimentado diretamente de um computador, através da porta USB existente ou através de alimentação externa, dado que possui reguladores de tensão de 3.3V e 5V. As portas digitais comunicam a 8 bits e são utilizadas tanto como entrada como saída enquanto que as portas analógicas comunicam a 10 bits, sendo usadas apenas como entrada ou leitura de componentes analógicos. Este microcontrolador possibilita facilidades de comunicação com um computador, com outras placas idênticas e com microcontroladores diferentes, através de comunicação série pela porta USB e estabelece ainda comunicação pelos protocolos I2C e SPI [40].

Tabela 4.2. Características do Arduino UNO [40].

<b>Microcontrolador</b>	ATmega328P
<b>Tensão de operação</b>	5V
<b>Tensão de entrada</b>	7-12V
<b>Pinos digitais (I/O)</b>	14
<b>Pinos analógicos (I)</b>	6
<b>Pinos PWM digitais (I/O)</b>	6
<b>Corrente DC máxima</b>	50mA
<b>Velocidade de relógio</b>	16 MHz
<b>Memória</b>	32 KB (Flash)
	2 KB (SRAM)
	1 KB (EEPROM)

A programação do Arduino é feita através de uma interface gráfica instalada num computador, ilustrada na Figura 4.10.

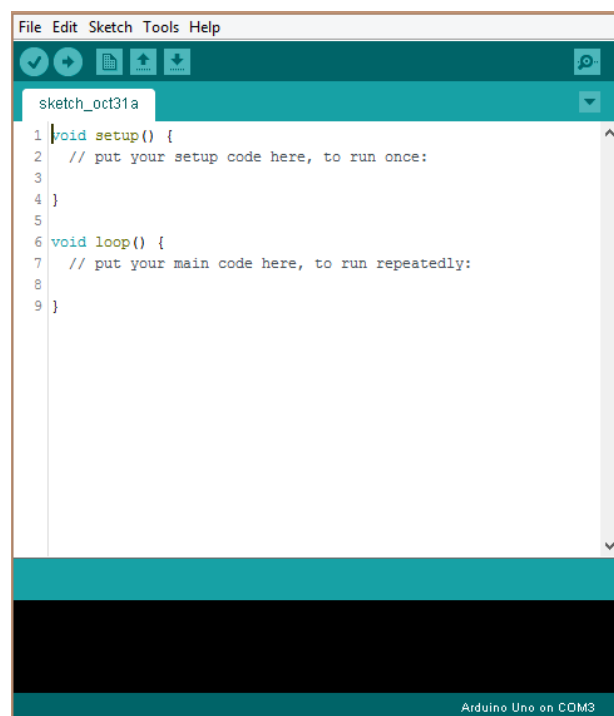


Figura 4.10. Interface de programação do Arduino.

Para este projeto, utilizou-se o Arduino para a implementação do algoritmo do seguimento solar. O cálculo da posição do Sol, que depende de muitas variáveis, como se pôde constatar pela secção 2.2, constitui um passo importante no desenvolvimento do projeto. Entre essas variáveis encontram-se as informações do calendário como a hora e o dia do ano e como é de se notar, o Arduino não possui um relógio interno capaz de fornecer essas informações, pelo que se recorreu a uma componente auxiliar.

Pretende-se ainda fazer a recolha de dados para a análise do desempenho do sistema, pelo que foi necessário recorrer a um *datalogger* próprio para o efeito, ilustrado na Figura 4.11. Esta placa é montada em cima do Arduino, dado que possui as mesmas dimensões e estabelece comunicação com o mesmo através dos protocolos acima mencionados. Possui um espaço para a introdução de um cartão de memória para a recolha de dados e um espaço de prototipagem eletrônica. Possui ainda um relógio de tempo real (RTC) que fornece a data e a hora atualizadas, dado que é alimentado independentemente dos outros componentes através de uma pilha [41].

Essa placa constitui uma mais-valia para o projeto, visto que oferece a possibilidade de acesso ao calendário para obtenção dos dados de entrada necessários para o cálculo da posição solar num dado instante e ainda a gravação destes e de outros dados.



Figura 4.11. Adafruit Data logging shield [41].

### 4.2.3 Sensores de luminosidade

Existe no mercado uma grande variedade de sensores de luz com aplicações muito distintas, sendo que os mais conhecidos são os foto-díodos, foto-transístores e as foto-resistências, que têm princípios de funcionamento diferentes. Os foto-díodos são semicondutores que convertem a luz em corrente elétrica, através da absorção de fótons. Os foto-transístores possuem o mesmo princípio de funcionamento que os transístores normais, diferenciando-se apenas por serem sensíveis à luz. Os LDR (*Light Dependent Resistor*) consistem numa pequena fotocélula, cuja resistência é variável mediante a intensidade da luz.

Para o projeto em questão, escolheu-se utilizar os LDR para a deteção da luz solar em que, quanto maior a intensidade da luz, menor será a resistência elétrica do sensor, pelo que utilizando o circuito auxiliar ilustrado na Figura 4.12, inverte-se o sinal. Com isto, a intensidade de luz e a resistência do sensor tornam-se diretamente proporcionais, de acordo com a equação 20, correspondente a um divisor de tensão.

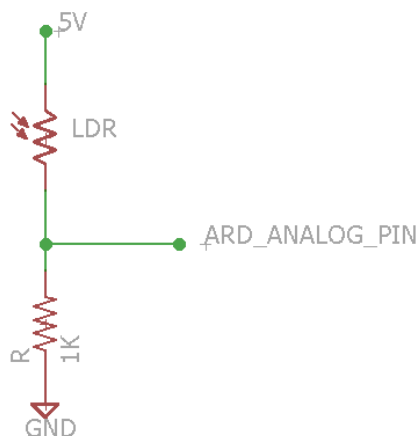


Figura 4.12. Circuito auxiliar para obtenção do sinal do LDR.

Pela aplicação de uma tensão na entrada do circuito, obtêm-se uma tensão à saída dependente da intensidade da luz. Esta tensão de saída é utilizada como uma variável de entrada analógica no Arduino, com um sinal variável entre 0 e 1023, dado que as portas analógicas comunicam a 10 bits.

$$V_{out} = \frac{R_2}{LDR + R_2} V_{in} \quad (20)$$

Através da comparação de sinais lidos em diferentes sensores é possível determinar com precisão a posição do Sol. Para garantir que há diferença de sinal entre estes, é preciso que estes estejam separados por uma pala que obstrua a luz solar em alguns dos sensores, a medida que o Sol avança. Para este projeto decidiu-se utilizar quatro sensores na realização do seguimento, em que são utilizados dois pares de sensores para cada eixo, facilitando a implementação do algoritmo. Como mostra a Figura 4.13, criou-se uma base circular para os sensores, igualmente dispostos e separados entre si por uma pala, utilizando o *SolidWorks*. Cada um dos sensores liga-se a um pino analógico do Arduino, de acordo com o circuito da Figura 4.12. Com o objetivo de instalar o suporte entre os módulos centrais do sistema de seguimento, criou-se uma base retangular com o comprimento equivalente a distância que separa os módulos, de cerca de 12 cm. Criou-se ainda outra peça retangular, com as mesmas medidas, utilizada como suporte traseiro e que juntas com parafusos, garantem uma boa fixação aos módulos. Este suporte contém ainda um espaço próprio para a instalação do acelerómetro digital para a medição dos ângulos nos eixos do sistema.

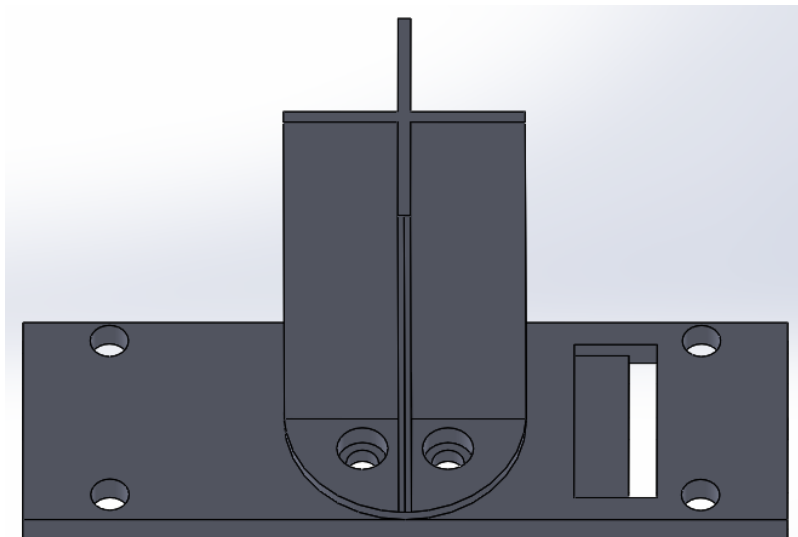


Figura 4.13. Base para a colocação dos sensores.

A precisão de seguimento solar é determinada de forma simples, através de regras trigonométricas. De acordo com a Figura 4.14, considerando que  $a$  representa a altura da pala e que  $b$  representa a distância dos sensores ao centro da circunferência, o ângulo de incidência dos raios solares ( $\theta_i$ ) é determinado pelas equações 21 e 22. Assim, para um dado valor de  $b$ , quanto maior o valor de  $a$ , menor será o ângulo de incidência entre os raios solares e os sensores e vice-versa. Da mesma forma, para um dado valor de  $a$ , quanto maior a distância dos sensores ao centro,  $b$ , maior será o ângulo de incidência. Assim, o ângulo de incidência é diretamente proporcional à distância dos sensores ao centro da base e inversamente proporcional à altura da pala.

$$\tan(\theta_i) = \frac{b}{a} \quad (21)$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \left( \frac{b}{a} \right) \quad (22)$$

Para este projeto desenhou-se uma base, com a distância dos sensores ao centro de 1 cm e a altura da pala de 8 cm obtendo um ângulo máximo de incidência de aproximadamente  $7^\circ$ , para que pelo menos um sensor esteja completamente à sombra.

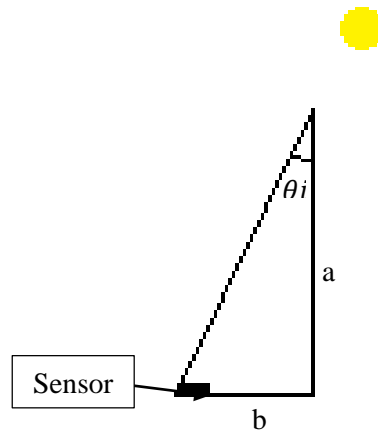


Figura 4.14. Relação entre o ângulo de incidência dos raios solares e as características da pala.

### Produção do suporte dos sensores de radiação

Concluída o desenho do suporte para os sensores, procedeu-se a sua produção, utilizando para o efeito a impressão 3D. Esta técnica consiste na sobreposição e preenchimento de várias camadas de material, criando um objeto tridimensional a partir do modelo que neste caso foi criado no *SolidWorks*. Existem vários materiais que podem ser utilizados em impressão 3D, tais como o PLA ou ABS, que normalmente têm a forma de filamentos finos e que são introduzidos na impressora em rolos. A impressora contém uma cama e extrusores que são aquecidas a temperaturas elevadas, de forma a derreter o material, para que se possa criar o objeto pretendido [42]. O modelo criado em computador, gravado no formato STL é introduzido na impressora e esta, contendo motores controlados eletronicamente com elevada precisão, movem os extrusores que contêm o material derretido e que dão forma física ao desenho.

Para o projeto em questão, utilizou-se uma impressora da marca *LeapFrog*, modelo *Creatr HS*, representada na Figura 4.15-A [42]. Na Figura 4.15-B, ilustra-se o processo de impressão do suporte dos sensores.

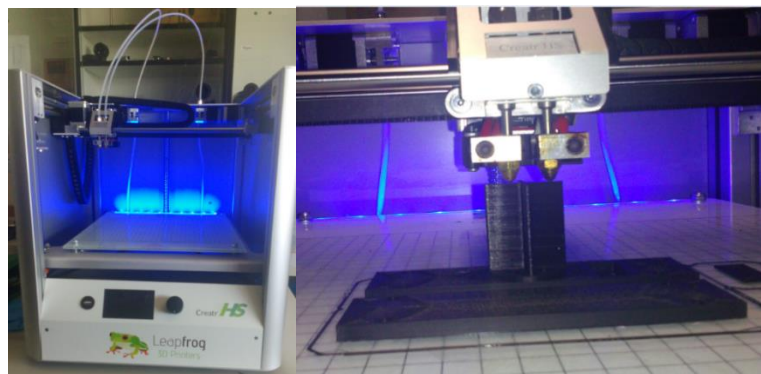


Figura 4.15. A-Impressora 3D LeapFrog; B-Processo de impressão do suporte dos sensores.

### 4.2.4 Estratégia de seguimento solar com os sensores de radiação

Concluída a produção do suporte para os sensores de luz, procedeu-se à implementação do algoritmo de seguimento solar através dos mesmos.

De acordo com a Figura 4.16, calcula-se um valor para cada lado da pala, correspondente a média aritmética dos valores lidos do conjunto dos dois sensores. Assim, o valor do lado direito (VD) corresponde a média dos valores do sensor do quadrante superior direito (SD) e do quadrante inferior

direito (ID), de acordo com a primeira combinação da equação 23. Da mesma forma, pela segunda combinação apresentada na equação 23, o valor do lado esquerdo (VE) corresponde a média dos sensores do quadrante superior esquerdo (SE) e inferior esquerdo (IE) e aplica-se o mesmo princípio para o valor superior (VS) e para o valor inferior (VI).

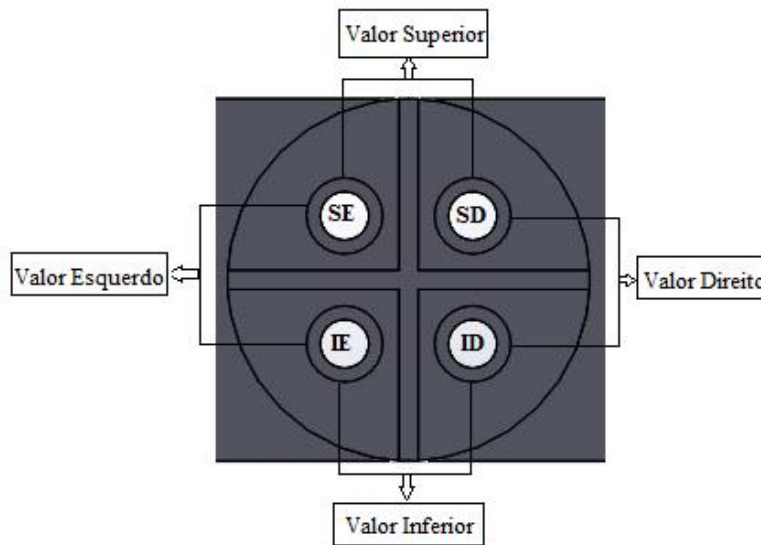


Figura 4.16. Valores atribuídos a cada conjunto de sensores.

$$VD|VE|VS|VI = \frac{SD|SE|SD|ID + ID|IE|SE|IE}{2} \quad (23)$$

Devido ao movimento do Sol e a posição dos módulos fotovoltaicos, a sombra criada pela pala que separa os sensores é diferente ao longo do tempo e consequentemente os valores calculados também o são. Pela variação do azimuth solar, há instantes em que o valor do lado direito é maior porque a luminosidade é mais intensa desse lado e há instantes em que é menor, pela razão oposta, assim como para os valores superior e inferior, devido a variação da elevação do Sol. O objetivo principal é garantir que os valores lidos pelo microcontrolador sejam iguais num dado instante, ou seja, garantir que não há sombra em nenhum dos quatro sensores, o que significa garantir que a pala aponte sempre para a posição em que está o Sol, pelo que se deve atuar constantemente nos atuadores responsáveis pelo posicionamento de cada eixo.

A Figura 4.17-A representa o procedimento realizado para o seguimento azimutal. O Arduino, ao ler o valor de cada sensor, calcula os valores correspondentes a cada lado, precedendo depois a sua comparação. Se os valores forem iguais, significa que nenhum dos sensores apresenta qualquer sombra, ou seja, que os painéis estão corretamente posicionados, perpendicularmente ao Sol, não sendo necessário corrigir o posicionamento da estrutura. Se por outro lado, o valor do lado esquerdo for maior, existe uma sombra do lado direito, logo é necessário que se mova a estrutura para a esquerda, até que os valores voltem a ser iguais. Esse procedimento é oposto caso o valor do lado direito seja maior, onde se deve mover a estrutura para o lado direito.

O procedimento para o ajuste vertical é semelhante ao processo de ajuste horizontal, mas neste caso a atuação dá-se no motor responsável pelo movimento vertical da estrutura e os dois valores a considerar são os valores da parte superior e da parte inferior, ilustrados anteriormente na Figura 4.16 e calculados pela equação 23.

Este procedimento está representado na Figura 4.17-B, onde o Arduino lê o valor de cada sensor e calcula os valores da para a parte superior e inferior. Caso estes sejam iguais, a estrutura mantém-se imóvel. Caso o valor superior seja maior, é necessário que aumentar o ângulo de elevação da estrutura e caso seja menor, é necessário diminuir esse mesmo ângulo até o ponto em que a leitura é semelhante para cada conjunto de sensores.

Deve notar-se que os dois processos de seguimento acontecem durante todo o dia e de forma sucessiva, atuando-se no eixo horizontal e depois na vertical. É um ciclo que tem a duração do dia, começando ao nascer do Sol e que termina quando ao pôr-do-sol, sendo assim possível manter os módulos numa posição sempre normal ao disco solar.

Para o caso de um dia de nebulosidade, o comportamento do seguidor será diferente dado que os níveis de radiação são diferentes e os sinais dados pelos sensores sofrem grandes variações. Para um dia com estas características, o seguidor irá sempre procurar a zona mais clara do céu, caso o disco solar esteja obstruído pelas nuvens, pelo que o posicionamento será menos preciso do que num dia de céu limpo em que a variação da luz ao longo do dia é mais uniforme e diretamente relacionada com a trajetória do Sol.

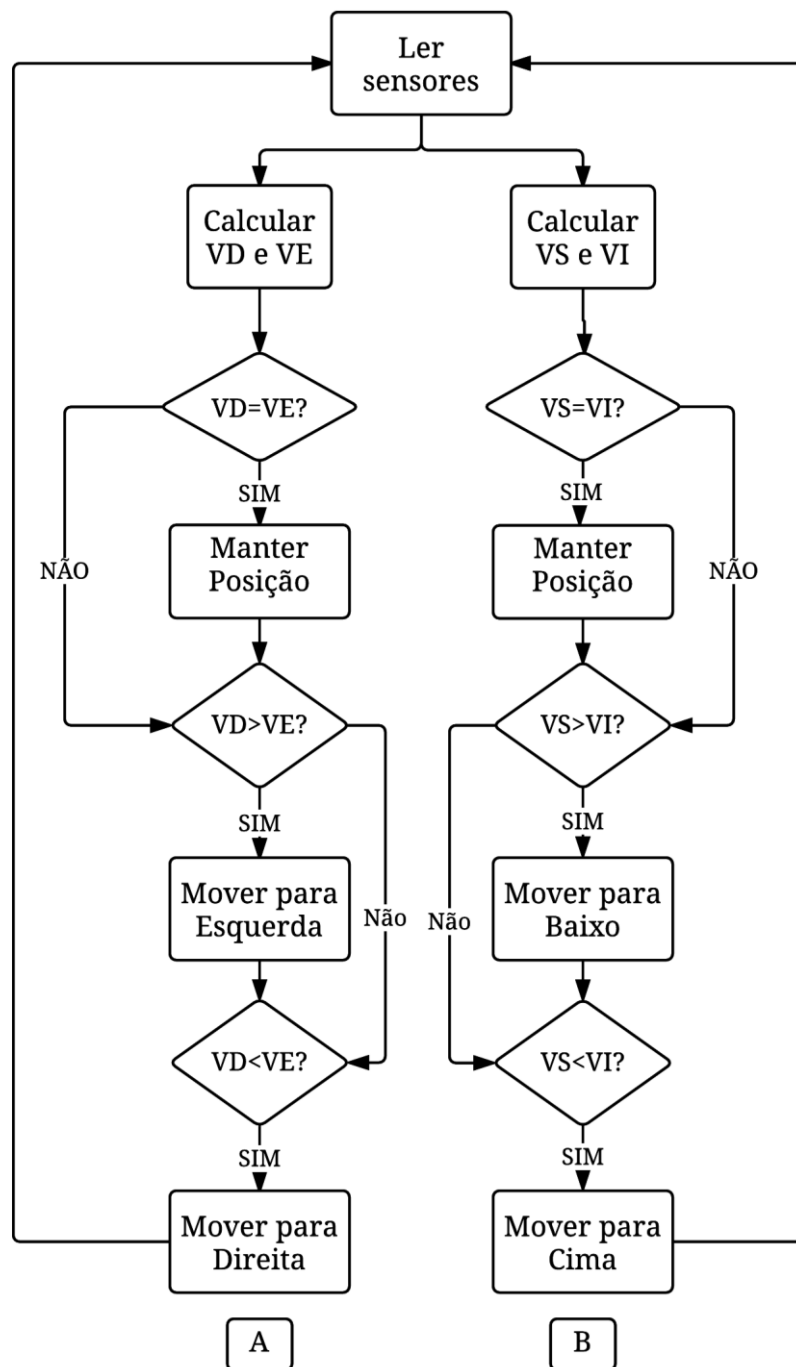


Figura 4.17. Processo de seguimento: A- Seguimento Azimutal; B- Seguimento Vertical.



#### 4.2.5 Estratégia de seguimento com calendário solar

A realização de seguimento solar através do calendário solar é um processo de relacionamento da posição do Sol com o estado dos atuadores lineares. Como referido anteriormente na descrição do sistema (secção 4.1), existem sensores magnéticos instalados junto ao veio dos braços mecânicos, dos quais não se tiram partido para o controlo do posicionamento, dado a inexistência de ímanes para os fazer atuar. Notou-se também que os interruptores de fim de curso também não eram utilizados, dado que não havia interação entre o veio dos braços mecânicos e o parafuso que faz movimentar a peça responsável pela ativação desses interruptores.

Como solução para esses dois problemas criou-se uma pequena peça, em forma de parafuso sem fim e com 4 ímanes, igualmente distribuídos, ilustrada na Figura 4.18. Essa peça foi instalada no veio do braço mecânico permitindo o contacto com a roda dentada que faz rodar o parafuso sem fim e que por sua vez faz movimentar a peça responsável pela ativação dos interruptores de fim de curso. Assim foi possível resolver o problema de não se conhecer os pontos extremos dos braços mecânicos. Quando um dos interruptores é ativado, o movimento do braço no sentido correspondente é imediatamente interrompido, isso porque a corrente do circuito é cortada, sendo possível atuar no braço mecânico apenas no sentido oposto. Com isto, é possível detetar quando é que os braços se encontram nos extremos, mas não quando se encontram numa posição intermédia.

Os ímanes colocados na peça encontram-se ao mesmo nível do sensor magnético, em que o objetivo é conhecer a posição do braço mecânico num dado instante e com essa configuração consegue-se ativar o sensor na passagem de um íman, através do movimento rotacional do veio. Com o circuito auxiliar ilustrado na Figura 4.19 é possível realizar a contagem dos pulsos emitidos pelo sensor e o número de pulsos correspondentes a extensão total do braço mecânico.

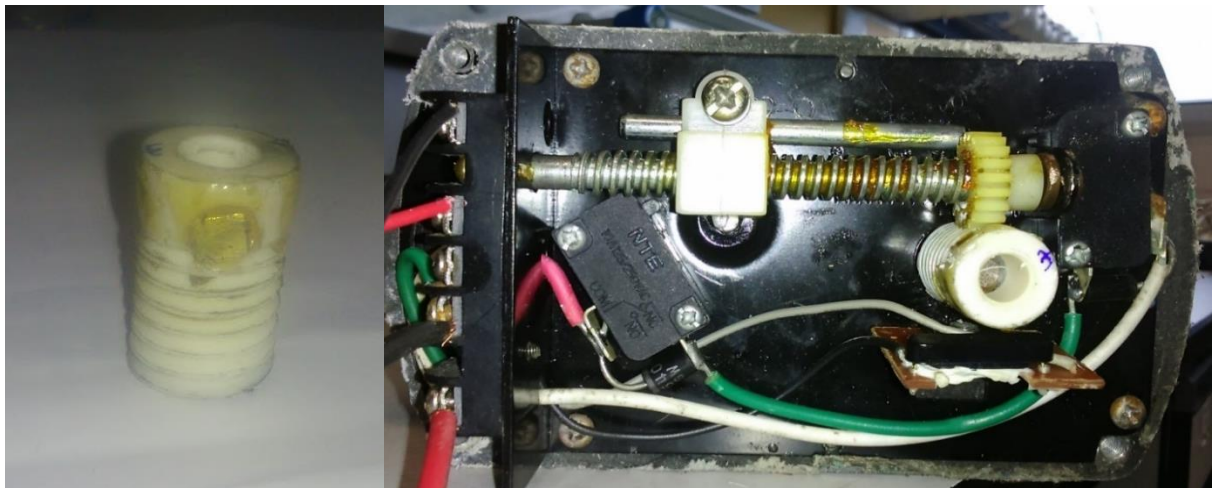


Figura 4.18. Parafuso para a ativação dos interruptores de fim de curso instalado no veio do braço mecânico.

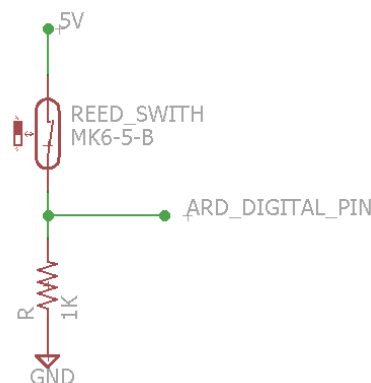


Figura 4.19. Circuito auxiliar para contagem de pulsos do Reed Switch.

O objetivo principal é relacionar o número de pulsos que indicam a posição atual do braço com os ângulos calculados teoricamente pelo Arduino, através das equações da posição do Sol em termos de elevação (equação 11) e azimute (equação 12). Conhecendo o total de pulsos correspondentes a variação angular dos módulos e a posição teórica do Sol em cada instante é possível determinar o número de pulsos correspondentes a essa posição, através da equação 22.

$$\text{Pulsos} = \text{ângulo calculado} \times \frac{\text{resolução total em pulsos}}{\text{resolução total em ângulo}} \quad (24)$$

Assim, à medida que o Sol avança ao longo de um dia, os pulsos calculados têm um valor sempre diferente e dependente do ângulo calculado. Comparando esse valor com os pulsos reais conseguidos através da contagem, é possível atuar nos braços até que estes dois valores sejam iguais.

O procedimento é o mesmo para os dois eixos de seguimento, embora tenham resoluções diferentes, tanto em número de pulsos como também em resolução angular. O procedimento repete-se sucessivamente até instante em que o interruptor de fim de curso de cada eixo é ativado, no final do dia. Nesta altura, o seguimento solar para este dia acaba e o objetivo passa a ser o posicionamento do seguidor para o dia seguinte. Calcula-se então a hora do nascer do Sol do próximo dia, que servirá como dado de entrada para determinar o azimute correspondente e com este, o número de pulsos, através da equação 22. Assim, dado que se conhece também o número de pulsos em que o braço está posicionado no final do dia, atua-se neste de modo a que o seguidor se oriente para o nascer do Sol do dia seguinte.

A realização do seguimento recorrendo ao calendário solar é importante visto que os sensores de radiação nem sempre funcionam da forma mais correta. Por exemplo, num dia de céu nublado e com o seguimento a ser realizado apenas recorrendo aos sensores de luz, estes não conseguem detetar a posição do Sol com precisão e logo, o posicionamento dos módulos será deficiente. Neste tipo de situação, o seguimento por calendário solar tem um papel fundamental, dado que pode ser utilizado para determinar teoricamente a posição do Sol e posicionar a estrutura corretamente.

As duas estratégias utilizadas abrem possibilidades de se implementar um processo de seguimento misto, para que o desempenho do sistema seja o melhor possível.

#### 4.2.6 Acelerómetro digital

Para realizar a medição dos ângulos em que os painéis solares do sistema de seguimento se encontram num determinado instante, utilizou-se um acelerómetro digital.

O dispositivo LSM303D, ilustrado na Figura 4.20, é composto por um acelerómetro e um magnetómetro, digitais, de três eixos (X, Y e Z). Este sensor é extremamente sensível, com uma gama de medição variável, desde  $\pm 2$  até  $\pm 16$  g para o acelerómetro e desde  $\pm 2$  até  $\pm 12$  gauss para o magnetómetro. Pode ser alimentado com uma tensão entre 2.5 e 5.5V, com consumo de corrente de 5mA, permitindo uma ligação direta ao Arduino, representando assim uma vantagem para o projeto. Para efeitos de comunicação com o sensor, pode-se utilizar os protocolos I2C ou SPI, suportados pelo microcontrolador [43]. Conectando os pinos deste sensor com os correspondentes pinos no Arduino e com a ajuda da biblioteca específica para esta aplicação, chega-se rapidamente aos ângulos, que neste caso correspondem a elevação e ao azimute.

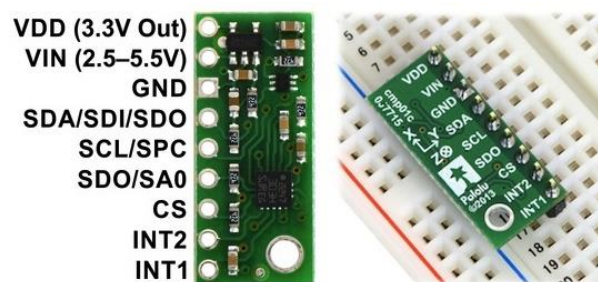


Figura 4.20. Acelerómetro [43].



Para a instalação do acelerómetro, aproveitou-se a configuração do suporte dos sensores de luz, descrita anteriormente. Como ilustrado na Figura 4.21, integrou-se o sensor na placa, de modo a que os ângulos medidos correspondam aos ângulos dos módulos, em que o ângulo do eixo XX, medido na vertical corresponde ao ângulo de elevação e o ângulo medido no eixo YY corresponde ao azimute da estrutura.

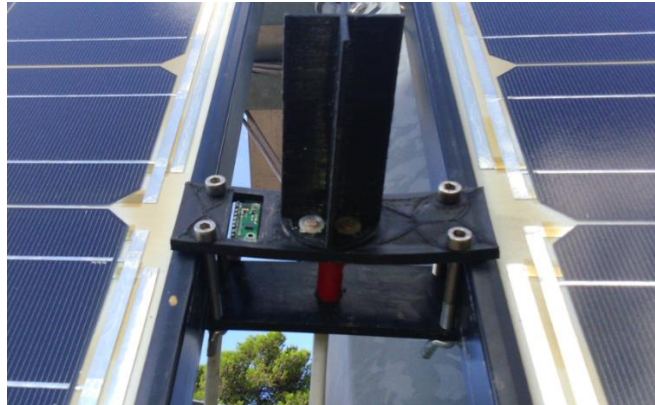


Figura 4.21. Instalação do acelerómetro na placa.

#### 4.2.7 Controlo dos atuadores lineares

A atuação nos atuadores responsáveis pelo seguimento solar constitui o passo mais importante do projeto e para isso pensou-se numa solução fiável e robusta, de modo a garantir que o sistema de controlo funcione de forma correta. A solução encontrada foi o uso de relés que possuem o mesmo princípio de funcionamento dos interruptores convencionais e podem ser controlados recorrendo a uma componente lógica, através de um sinal digital. Para a realização do seguimento, cada eixo do sistema deve ser controlado nos dois sentidos e para esse efeito, criou-se o circuito ilustrado na Figura 4.22. Para a alimentação dos atuadores recorreu-se a um transformador de 36V com a devida retificação do sinal e transformação para corrente contínua, tirando partido do facto de à saída do inversor ter-se 230V AC.

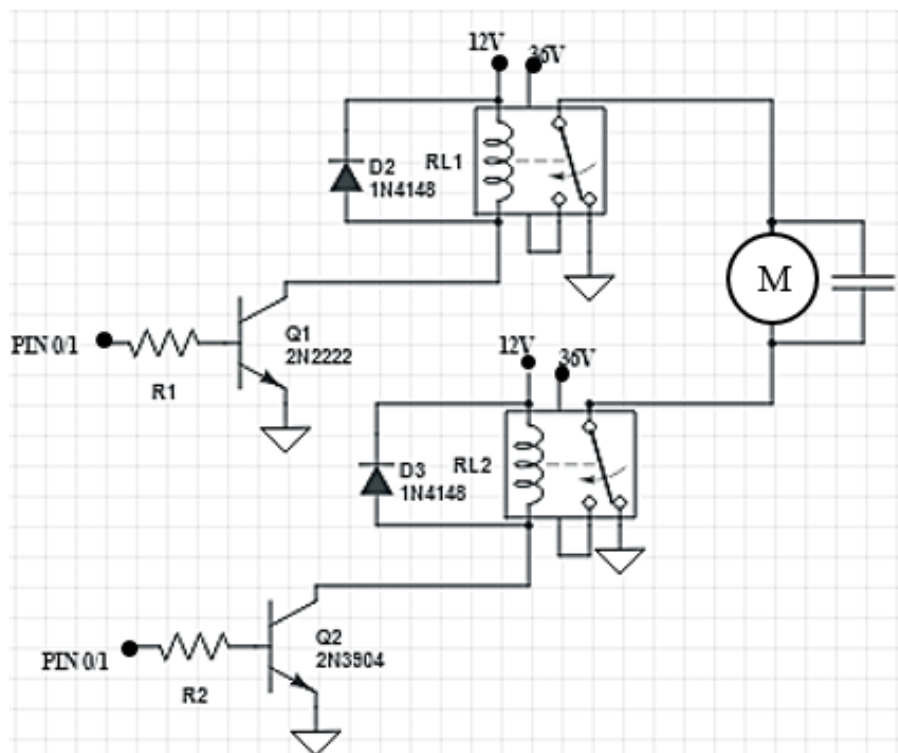


Figura 4.22: Circuito de controlo dos motores.

Este circuito é constituído por duas partes iguais, cada uma para um sentido de rotação do motor, ou seja, quando se atua numa parte, o motor roda para a direita, fazendo com que o braço mecânico se mova para a frente e quando se atua na outra o motor roda no sentido contrário, provocando o movimento também contrário do braço. Os contatos dos relés que se encontram em aberto estão ligados a uma fonte de tensão de 36V e os contatos ligados aos polos do motor encontram-se ligados à massa, garantindo que este esteja sempre parado e sem consumir nenhuma corrente elétrica. A parte eletromagnética de cada relé está a ser alimentado por uma tensão de 12V, conectado ao coletor de um transistor, que por sua vez, tem a base ligada a um pino digital do Arduino e o emissor ligado à massa. Assim, cada vez que se emite um sinal de 5V na base de um dos transistores, a parte eletromagnética do relé correspondente é ativado, fazendo que o contacto antes ligado à massa se desloque para o ponto de tensão de alimentação do motor. Com isso, dado que um dos polos do motor fica ligado à tensão de alimentação e o outro polo ligado à massa, este roda na direção correspondente, instantaneamente. Para que o motor rode em sentido contrario, basta que se aplique um sinal ao outro pino ligado ao Arduino.

#### **4.2.8 Circuito experimental geral**

Com todos os processos mencionados anteriormente, criou-se o circuito geral ilustrado na Figura 4.23, que integra a parte do controlo dos atuadores e ainda a parte de ligação dos diferentes sensores. Utilizou-se ainda reguladores de tensão de modo a obter tensões de 12V para a alimentação dos relés e de 5V para alimentação do Arduino, do acelerómetro, dos sensores magnéticos e dos sensores de luz a partir da fonte de 36V.

Na Figura 4.24 ilustra-se a caixa com a montagem experimental do sistema de controlo de seguimento onde se pode ver as principais componentes como o Arduino e o *datalogger* de gravação de dados, a fonte de alimentação do sistema e os outros componentes lógicos integrantes do sistema.

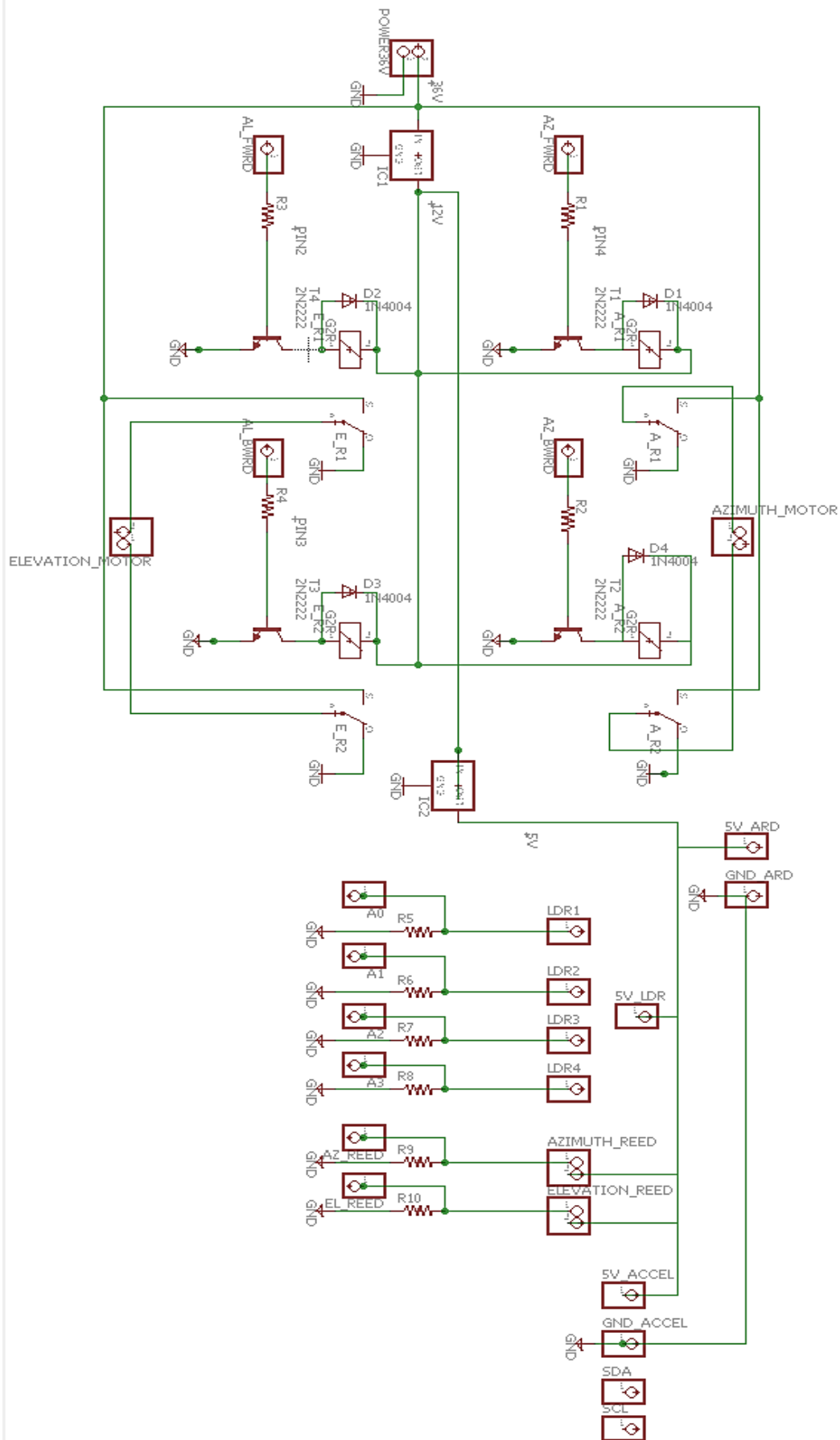


Figura 4.23. Circuito geral de controlo do sistema de seguimento.

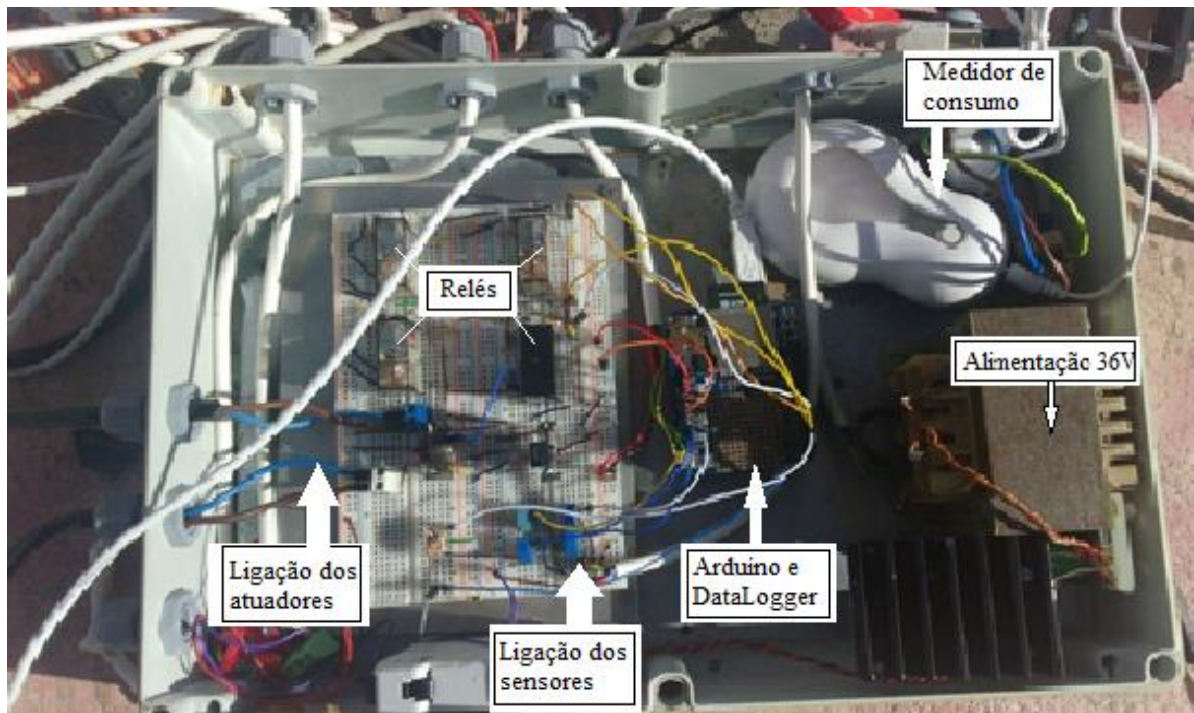


Figura 4.24: Caixa com a montagem experimental.

### 4.3 Monitorização do sistema

De modo a verificar se o sistema de seguimento cumpre com os objetivos traçados é necessário analisar vários parâmetros, pelo que se realizou uma campanha de obtenção de dados entre os dias 21 de agosto e 11 de setembro de 2015. Como objetivo principal, tem-se a monitorização do sistema em termos de qualidade do seguimento realizado, sendo ainda obtidos dados de produção de energia de modo a analisar o ganho imposto pelo seguimento em relação a um sistema estacionário e ainda dados de consumo de energia do sistema de controlo.

#### 4.3.1 Dados de seguimento

Para a análise do processo de seguimento, criou-se uma base de dados no *datalogger*, com os dados teóricos calculados e com os dados de ângulo medidos no sistema, como mostra o exemplo da Tabela 4.3, para o dia 23 de agosto de 2015. Os dados do calendário são dados pelo RTC, o ângulo horário, o azimute e a elevação solar são calculados pelo *Arduino*, recorrendo as equações correspondentes e ainda o ângulo horizontal (eixo YY) e o ângulo vertical (eixo XX) medidos pelo acelerómetro digital instalado no sistema.

Estes dados são utilizados para efeito de análise da qualidade do seguimento em relação a trajetória teórica do Sol. Para cada dia o equipamento de recolha de dados cria uma base de dados diferente, em que os dados são recolhidos num intervalo de tempo de 4 minutos desde o nascer até o pôr-do-sol, facilitando o acesso aos dias específicos para análise.

Tabela 4.3. Exemplo de alguns dados recolhidos para o dia 23 de Agosto.

Ano	Mês	Dia	Hora	HRA (°)	Azimute (°)	Elevação (°)	Ângulo eixo horizontal (°)	Ângulo eixo vertical (°)
2015	8	23	07:04:00	-98,73	-77,20	0,23	-44,58	39,85
2015	8	23	07:08:00	-97,73	-76,58	0,99	-44,57	39,89
2015	8	23	07:12:00	-96,73	-75,96	1,75	-44,52	39,95

### 4.3.2 Dados de produção de energia

Para a análise da produção de energia do sistema aproveitou-se o equipamento de medição do sistema original, que fornece todas as informações necessárias. Com os dados recebidos obtêm-se os gráficos de produção, para qualquer hora do dia, onde se pode avaliar o desempenho do sistema. Pode-se ainda comparar a produção diária, mensal ou anual, tendo ainda a possibilidade de guardar os dados sob a forma de uma base de dados ou numa folha de cálculo. Para o período experimental, apenas três módulos fotovoltaicos estiveram em operação, pelo que a potência total instalada corresponde a 630 Wp.

Com o objetivo de quantificar o ganho de energia do sistema de seguimento em relação a um sistema fixo com as mesmas características, é necessário quantificar a produção de ambos os sistemas. Não tendo a possibilidade de obter dados de um sistema fixo, aproveitou-se os dados de irradiância de uma estação meteorológica instalada no Campus Solar, para a realização de uma estimativa de produção de um sistema fixo, com a mesma potência de pico do sistema de seguimento solar.

A estação meteorológica, ilustrada na Figura 4.25, encontra-se no local a adquirir dados de radiação solar, temperatura e pressão atmosférica. Para a aquisição dos dados de radiação solar, a estação conta com a instalação dois piranómetros (GHI e DHI) e um pireliómetro (DNI), como equipamentos de medida. A estação meteorológica conta com um processo próprio de seguimento solar e todos os dados de irradiância solar medidos e da trajetória do Sol são gravados num *datalogger*, num intervalo de 1 minuto.

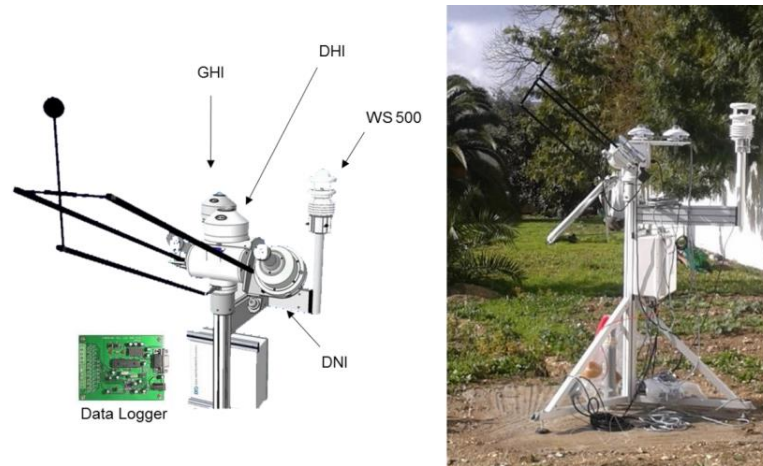


Figura 4.25. Estação meteorológica instalada no Campus Solar da FCUL [30].

Para a estimativa de produção do sistema fixo usando os dados de irradiância, recorre-se a equação 25, que representa a potência instantânea de um sistema fixo. Recorrendo às características dos módulos instalados no sistema de seguimento, ilustrados na Tabela 4.1, nomeadamente a eficiência ( $\eta$ ) e a área útil ( $A$ ) e considerando que o sistema fixo se encontra orientado à Sul e com uma inclinação ótima ( $\theta$ ) de  $35^\circ$ , calcula-se a potência instantânea entregue pelo mesmo, quando exposto à irradiação global (GHI). Considerando ainda que a potência instalada do sistema de seguimento é correspondente à potência de três módulos fotovoltaicos, considera-se o mesmo número de módulos para a estimativa do sistema fixo ( $n$ ). Nota-se ainda que esta estimativa de produção do sistema fixo não tem em conta efeitos da temperatura ou espectrais, tornando-se em um modelo muito simples.

$$P_{\text{est}} = \text{GHI} \times \cos \theta \times \eta \times A \times n \quad (25)$$

Com os dados da radiação da estação meteorológica, estima-se ainda a radiação global que incide no plano normal (GNI) de um seguidor de dois eixos ideal, através do modelo apresentado na equação 26 [8]:

$$\text{GNI} = \text{DNI} + \text{DHI} \left( \frac{1 + \cos \theta_z}{2} \right) \quad (26)$$



Este modelo assume o céu como sendo isotrópico e que a radiação difusa é uniformemente distribuída em toda a cúpula celeste. Assume-se ainda que a radiação difusa proveniente do circumsolar e do horizonte iluminado não têm valor significativo [8]. Com a estimativa do GNI é possível estimar a produção de um sistema de seguimento ideal, com as mesmas características apresentadas pelo seguidor real, através da equação 27:

$$P_{\text{est\_ideal}} = \text{GNI} \times \eta \times A \times n \quad (27)$$

Através da comparação da produção estimada pelo modelo com a produção do seguidor real é possível conhecer a qualidade do seguimento realizado e validar a metodologia utilizada.

### 4.3.3 Dados de consumo de energia

O consumo de energia do sistema de seguimento constitui um aspeto importante na análise do desempenho do sistema, onde o objetivo é maximizar a energia produzida, com o menor consumo possível. Sendo assim, é necessário realizar uma análise de custo-benefício, de forma a apurar a quantidade de energia que é consumida pelo sistema e poder compará-lo com outros sistemas existentes no mercado.

Para este projeto, utilizou-se um sistema denominado *Cloogy* para a medição do consumo de energia dos atuadores lineares e do sistema de controlo do seguimento. O *Cloogy* é um equipamento de medição e gestão de energia elétrica, utilizado tanto nas habitações bem como para equipamentos de micro geração. Através de tomadas inteligentes, monitora-se o consumo individual de equipamentos, podendo atuar sobre eles, ligando-os e desligando-os de forma programada e remotamente, basta que exista uma rede local de internet. Este *kit* é constituído por várias componentes, entre eles, um sensor, um visualizador, um transmissor e um concentrador de dados, como mostra a Figura 4.26 [44].

O sistema de medição de consumo de energia é de montagem fácil, tendo apenas que instalar o sensor na alimentação do sistema, mais precisamente na fase da alimentação do sistema (230V AC, à saída do inversor), medindo o consumo de todo o sistema de seguimento, como ilustra ainda a Figura 4.26.

O funcionamento deste sistema tem por base a recolha de dados medidos pelo sensor, ligado a um transmissor e esta por sua vez, envia os dados para o concentrador, que está ligado a uma rede de internet, de onde é possível consultar os dados, através do visualizador, de um computador ou de um dispositivo móvel. Podem ser medidas grandezas como a corrente, tensão, frequência da rede, potência, energia e fator de potência, com bastante fiabilidade. Pode medir correntes até 50A e tensões até 400V, demonstrando grande capacidade e sendo assim, aconselhável para o projeto em desenvolvimento. O sistema funciona através de medição de pulsos no sensor de 5 em 5 segundos e apresenta os dados medidos em intervalos de 15 minutos [44].

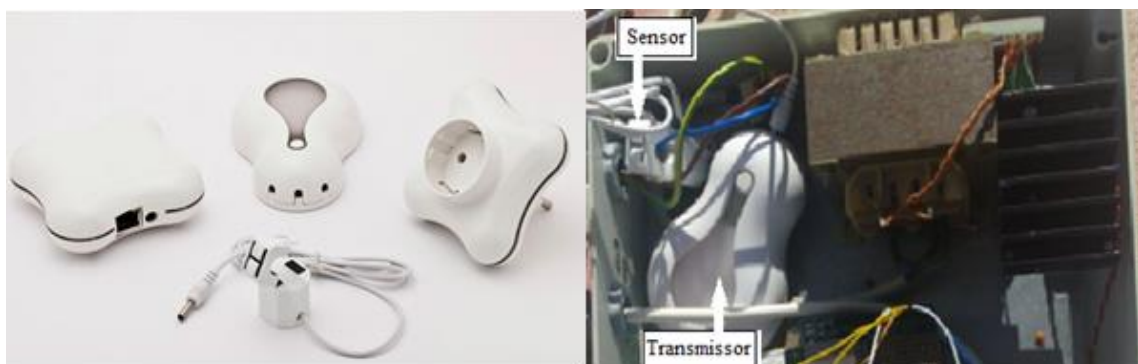


Figura 4.26. Kit Cloogy para a monitorização do consumo de energia do sistema [44].

## 5. Apresentação e discussão dos resultados

Este capítulo tem como objetivo a apresentação e análise dos resultados obtidos durante a campanha experimental decorrida entre os dias 21 de agosto e 11 de setembro de 2015. Pretende-se analisar o comportamento do sistema de seguimento solar, em termos da qualidade do seguimento, da produção e do consumo de energia elétrica.

No intervalo de tempo em análise, as condições atmosféricas não permaneceram constantes, havendo dias de céu limpo e dias em que o céu esteve parcialmente nublado. Assim, além de se apresentar os resultados gerais do sistema, analisam-se dois casos específicos para dois dias de características diferentes, de modo a avaliar o impacto da variabilidade nas condições atmosféricas no desempenho do sistema:

- 1º Caso de estudo: Dia de céu limpo – 06 de agosto de 2015
- 2º Caso de estudo: Dia de céu nublado – 24 de setembro de 2015

No primeiro caso de estudo pretende-se isolar qualquer efeito da variação abrupta da irradiância, de modo a perceber a forma como o sistema se comporta, em condições favoráveis. Para o segundo caso pretende-se analisar o comportamento do sistema tendo em conta a variabilidade da irradiância em instantes de tempo relativamente reduzidos. Utilizou-se os dados de irradiância direta no plano normal (DNI) da estação meteorológica descrita anteriormente para detetar os dias de céu limpo e os dias de condições parcialmente ou totalmente adversas e estabelecer uma relação com os dados recolhidos do sistema de seguimento, para os mesmos dias.

### 5.1 Qualidade do seguimento solar

Sendo que o seguimento solar realizou-se recorrendo apenas aos sensores de radiação durante o período experimental (por dificuldades na contagem de pulsos), espera-se que a qualidade do seguimento esteja diretamente relacionada com a disponibilidade da irradiância direta (DNI).

A Figura 5.1 ilustra a distribuição da irradiância direta medida pela estação meteorológica durante a primeira semana da campanha experimental (21 a 27 de agosto). Este período contou com dois dias de céu limpo (21 e 25 de agosto), em que a irradiância não sofre grande variabilidade em pequenos períodos de tempo, atingindo o máximo ao meio dia solar. Nos outros dias, observou-se uma grande variabilidade na irradiância direta em alguns intervalos de tempo, traduzindo-se na presença de nebulosidade e obstrução do disco solar.

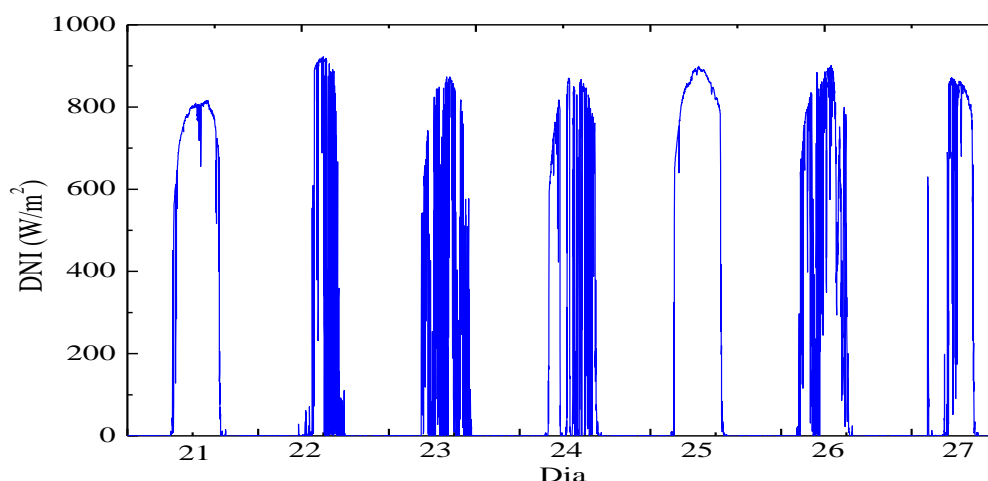


Figura 5.1. Irradiância direta (DNI) medida entre os dias 21 e 27 de agosto de 2015.

A Figura 5.2 ilustra o comportamento dos eixos do seguidor solar, relativamente à trajetória teórica do Sol na mesma semana (21 a 27 de agosto). Na Figura 5.2-A representa-se a elevação solar teórica calculada pela equação 11 e ainda o ângulo medido pelo acelerómetro, para o eixo correspondente a

elevação solar. Da mesma forma, na Figura 5.2-B representa-se o azimuth solar calculado pela equação 12 e ainda o ângulo azimuthal experimental. Para cada um dos eixos, o seguidor realiza um acompanhamento aceitável do disco solar, apresentando menor qualidade de seguimento do disco solar nos dias de maior nebulosidade. Nos dias 21 e 25 o posicionamento do sistema se aproxima mais da trajetória do Sol em ambos os eixos. Nos restantes dias há uma maior interferência no posicionamento do seguidor, havendo bastante variabilidade no ângulo medido em períodos de tempos muito próximos devido a ausência de irradiância direta. Ainda assim, em qualquer dos dias a trajetória do seguidor segue o perfil da trajetória do Sol, exceto nos períodos em que está limitado pelos interruptores de fim de curso, permanecendo estático.

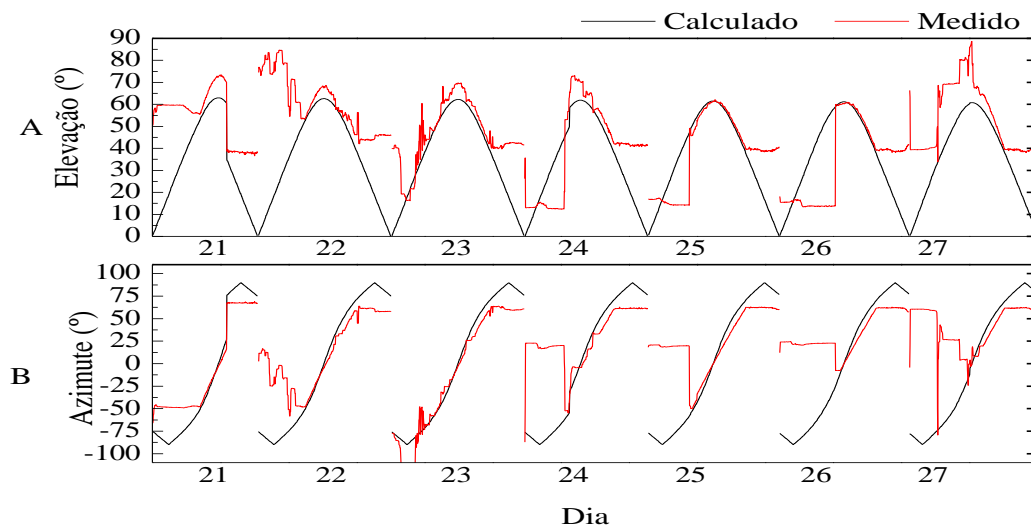


Figura 5.2. Trajetória do Sol e do sistema de seguimento entre 21 e 27 de agosto de 2015. A- Comparação dos ângulos de elevação solar calculados e medidos no sistema. B- Comparação dos ângulos de azimuth solar calculados e medidos no sistema.

A Figura 5.3 ilustra a distribuição da irradiância direta durante a terceira semana experimental (5 a 11 de setembro), de onde se pode verificar a existência de mais dias de céu limpo, comparativamente com a primeira semana de funcionamento do sistema de seguimento solar. Contrariamente à primeira semana em análise, a variabilidade da irradiância direta é menos acentuada, resultando numa menor obstrução do disco solar. Assim sendo espera-se que o seguimento realizado seja mais correto e fiável, comparativamente à primeira semana. Ainda assim, principalmente nos dias 5, 8 e 9 espera-se um comportamento menos correto por parte do seguidor, por se verificar uma maior variabilidade na irradiância direta em relação aos outros dias da mesma semana.

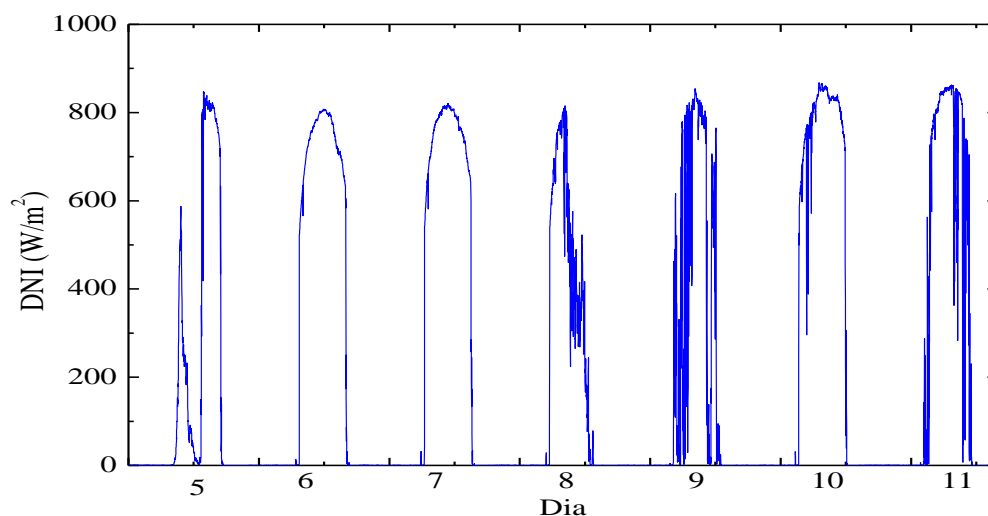


Figura 5.3. Irradiância direta (DNI) medida entre 5 e 11 de setembro de 2015.



De forma semelhante, representa-se na Figura 5.4 a trajetória solar teórica e também o ajustamento do seguidor para a terceira semana. A qualidade do seguimento vai de encontro com a disponibilidade da irradiância direta, ilustrada na Figura 5.3. Constata-se a existência de maior variação angular no seguidor nos dias de menor disponibilidade de irradiância direta, estando representado na Figura 5.4-A o eixo de elevação solar, e na Figura 5.4-B o ângulo azimutal. Nos restantes dias verifica-se um acompanhamento muito eficiente nos dois eixos de seguimento solar, em que o ângulo medido pelo acelerómetro permanece sempre muito próximo do ângulo calculado pelo microcontrolador, exceto no início e no final do dia devido a limitação no início e no fim de curso, referidas anteriormente.

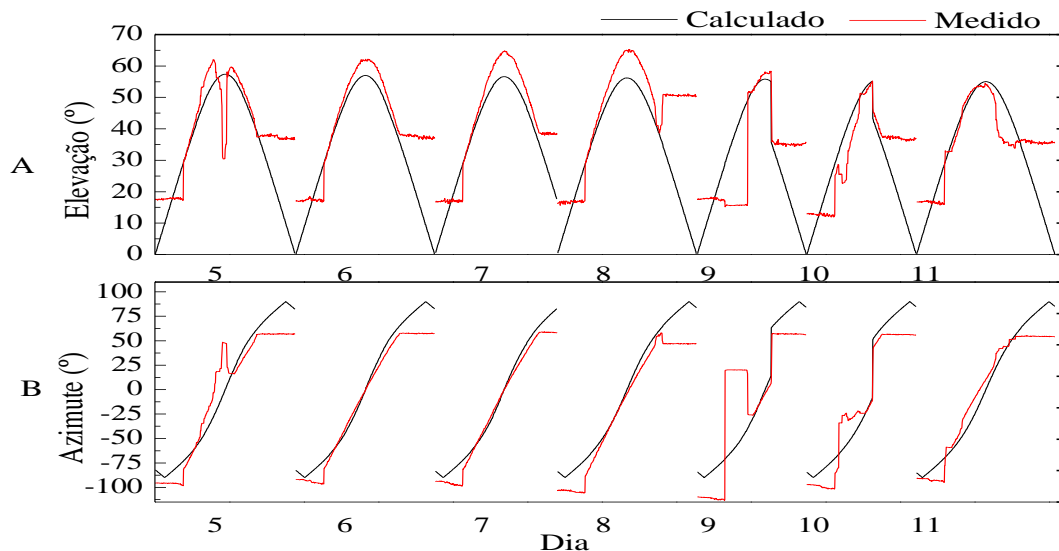


Figura 5.4. Trajetória do Sol e do sistema de seguimento entre 5 e 11 de setembro de 2015: A- Comparação dos ângulos de elevação solar calculados e medidos no sistema. B- Comparação dos ângulos de azimute solar calculados e medidos no sistema.

Posteriormente apresenta-se os casos de estudo, em que se analisa a qualidade do seguimento solar de forma detalhada.

### 5.1.1 1º Caso de estudo: Dia de céu limpo

Na Figura 5.5 ilustra-se a curva da irradiância direta, medida pela estação no dia 6 de agosto, em que se verifica a inexistência de variabilidade abrupta na disponibilidade da irradiância direta e que o valor máximo de cerca de  $800 \text{ W/m}^2$  é atingido no instante do dia em que a altura solar é máxima.

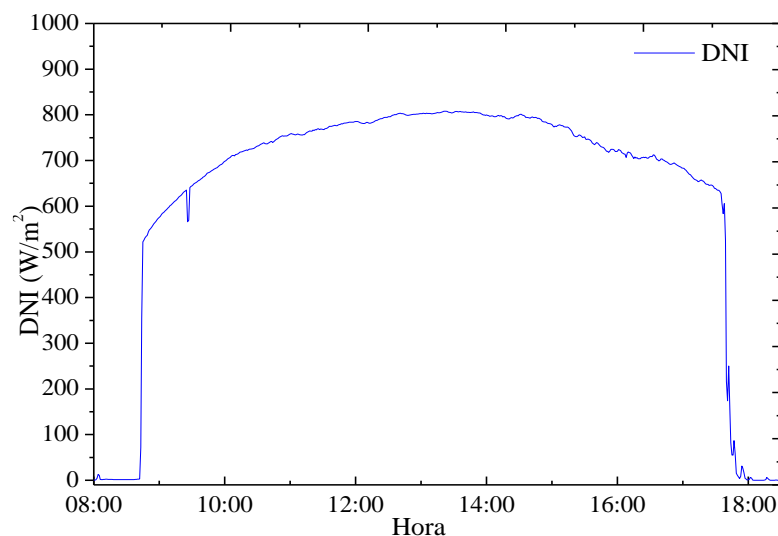


Figura 5.5. Irradiância direta (DNI) medida no dia 06/09/15.

Na Figura 5.6 está representada a trajetória do Sol e do sistema de seguimento de os dois eixos. Analisando as trajetórias constata-se que o sistema não inicia o processo de seguimento logo ao nascer do Sol. Ao início do dia, os dois eixos do sistema se mantêm imóveis até por volta das 10h devido aos limites mínimos dos atuadores. Até esse instante os interruptores de fim de curso estão ativados, dado que esse ponto corresponde ao alcance mínimo tanto do eixo vertical (Figura 5.6-A) como do eixo horizontal (Figura 5.6-B). No período que antecede esse ponto, mesmo que os sinais dados por cada conjunto de sensores sejam diferentes, a plataforma permanece imóvel. Quando o Sol atinge o ponto em que sinal dado pelos sensores do lado Oeste é superior ao do lado Este (sombra no lado Este), inicia-se o processo de ajuste do eixo horizontal, sendo também coincidente com o ajuste vertical.

Como nesse dia houve sempre irradiância direta disponível, observou-se um seguimento muito preciso por parte do sistema. O ângulo vertical medido pelo acelerômetro está muito próximo da curva teórica de elevação do Sol, tendo apenas desviado desse ponto nos instantes próximos do meio-dia solar, que pode estar relacionado com erros de calibração dos sensores ou do acelerômetro. A partir desse ponto, as trajetórias aproximam-se, até o ponto em que o atuador responsável pelo movimento vertical atinge o limite, ativando o interruptor de fim de curso. Simultaneamente a este processo dá-se o ajuste azimutal, em que durante todo o dia o ângulo medido pelo acelerômetro está muito próximo do ângulo azimutal teórico. Da mesma forma, quando o atuador atinge o limite máximo, o interruptor de fim de curso é ativado, o que resulta numa leitura constante até o fim do dia.

De um modo geral verifica-se que num dia de céu limpo o seguidor não se desvia de forma significativa da trajetória do Sol. Dado que há sempre irradiância disponível, criam-se sombras em alguns dos sensores (provocando leituras de sinais diferentes) e consequentemente há um ajuste nos atuadores feito pelo Arduino, no sentido de alinhar todos os sensores com o Sol, de modo a que o valor da diferença dos sinais lidos seja o mínimo possível.

Dado que o sistema funciona numa configuração *open-loop*, a resposta do mesmo está sempre dependente de condições externas, ou seja, o seguimento estará sempre condicionado pelas condições de nebulosidade. Ainda assim, visto que não se trata de um sistema de concentração que exige um seguimento de alta precisão, considera-se o seguimento do sistema muito satisfatório, fazendo com que os módulos fotovoltaicos estejam praticamente normais ao Sol ao longo do dia, cumprindo o objetivo de aumentar a área efetiva dos módulos comparativamente a um sistemas fixos.

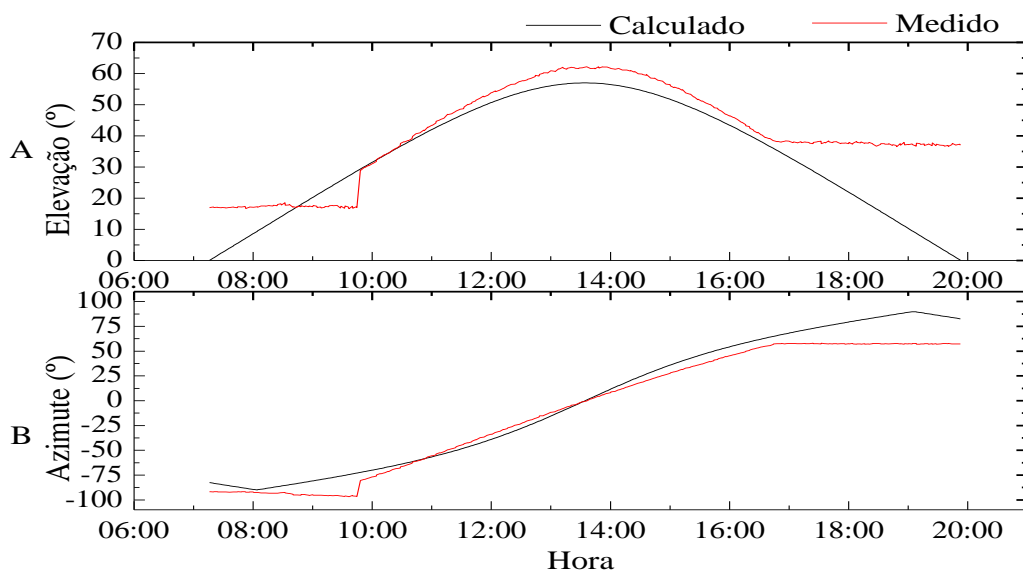


Figura 5.6. Trajetória do Sol e do sistema de seguimento no dia 06/09: A- Comparação dos ângulos de elevação solar calculados e medidos no sistema. B- Comparação dos ângulos de azimuth solar calculados e medidos no sistema.

A Figura 5.7 ilustra o desvio do sistema de seguimento em relação a trajetória teórica do Sol, tanto para o eixo de elevação como para o eixo de azimute. Esse desvio é calculado pela diferença entre o ângulo teórico calculado e o ângulo medido num dado instante. As setas indicam os pontos em que os interruptores de fim de curso são desativados ao início do dia e ativados ao fim do dia, para cada eixo. Observa-se um desvio máximo de  $5^\circ$  para o eixo de elevação e um desvio máximo de cerca de  $10^\circ$  para o eixo azimutal. Vê-se que o ângulo do eixo de elevação permanece sempre superior ao ângulo teórico, dado que a diferença é sempre negativa. Para o azimute a variação é diferente, estando adiantado em relação ao teórico num período de tempo e atrasado noutro período. Essas diferenças não estão diretamente relacionados com a disponibilidade de irradiância direta, já que este permanece sempre em níveis elevados. Podem estar relacionados com a resposta diferente por parte dos sensores do lado direito em relação aos do lado esquerdo ou falhas na calibração dos mesmos ou do acelerómetro.

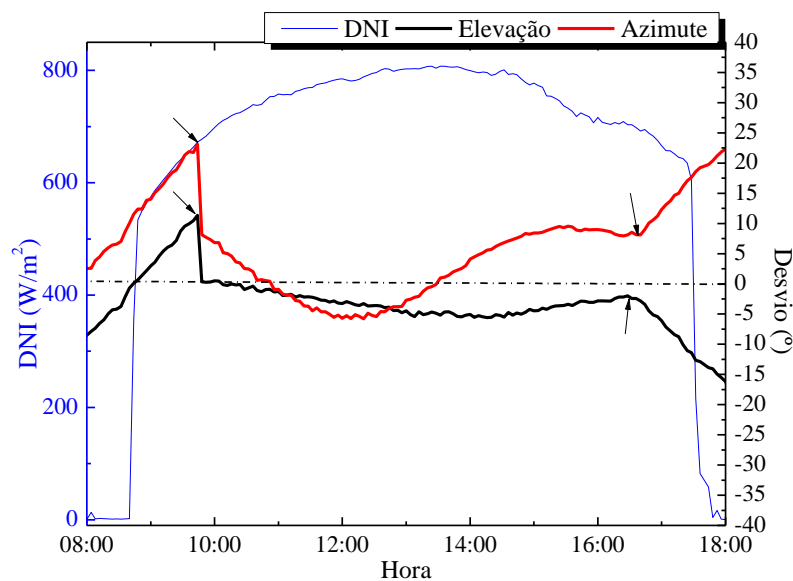


Figura 5.7. Desvio dos eixos do sistema de seguimento em relação a trajetória teórica para o dia 06/09.

### 5.1.2 2º Caso de estudo: Dia de céu nublado

Na Figura 5.8 ilustra-se os valores de irradiância direta medidos pela estação meteorológica no dia 24 de setembro. Durante o dia houve vários períodos de nebulosidade, em que a irradiância direta medida é nula e outros períodos em que a irradiância medida corresponde aos valores esperados, o que significa que o Sol não se encontrava obstruído pelas nuvens.

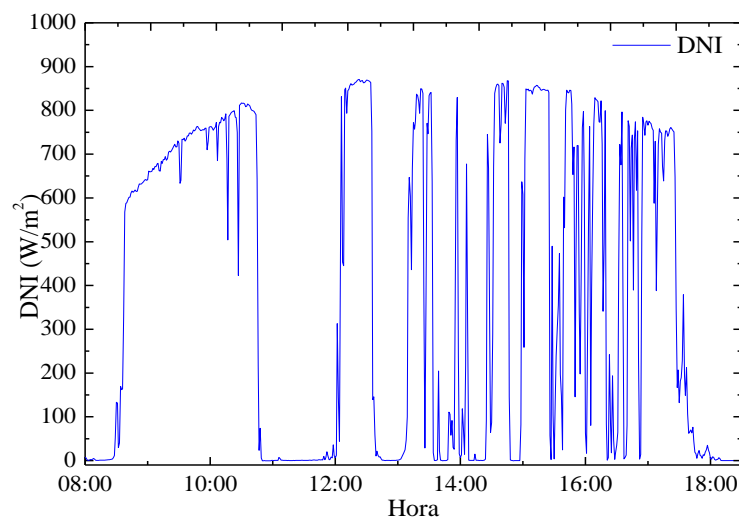


Figura 5.8. Irradiância direta (DNI) medida no dia 24/08/15.

Na Figura 5.9 encontra-se representado a trajetória do Sol e do sistema de seguimento em estudo, para cada um dos eixos. Da análise da Figura 5.9-A verifica-se que o sistema entrou em movimento logo ao nascer do Sol, em que o ângulo de elevação baixa para um valor próximo dos 13° e se mantém nessa posição até por volta das 11h, o que indica que neste período de tempo a diferença entre os sinais emitidos pelos sensores de luz não é significativo para atuar nos braços mecânicos. Por volta das 11h o eixo vertical começa a se movimentar e a seguir a trajetória do Sol, o que significa que a diferença de sinal entre cada grupo de sensores já permite detetar a posição onde o Sol se encontra, até atingir o limite imposto pelo interruptor de fim de curso. Da mesma forma, como se pode observar na Figura 5.9-B, o eixo horizontal iniciou o seu movimento logo ao nascer do Sol, posicionando num ângulo de cerca de 20° e mantendo essa posição até o mesmo instante que o eixo vertical. A partir desse ponto também inicia o processo de seguimento e se mantém próximo da trajetória do Sol.

Analisando os dois eixos de forma conjunta conclui-se que ao nascer do Sol, o nível de irradiância não foi suficiente para que o sistema mantenha o seu posicionamento inicial como acontece com um dia de céu limpo e iniciou o movimento “à procura” de um ponto onde o nível de irradiância fosse superior. Dado que os sensores emitem sinais todos semelhantes, visto que estão todos à sombra, a plataforma mantém-se imóvel. Quando o Sol avança na sua trajetória e atinge o ponto em que o nível de irradiância permite identificar diferenças nos sensores, inicia-se o processo de seguimento nos dois eixos, ainda que o ajuste seja um pouco variável devido a variação da disponibilidade de irradiância direta.

Quando a plataforma não se mantém posicionado corretamente no início do dia e ao procurar um ponto mais claro do céu, este não estará definido. Assim, se para este dia o seguidor se posicionasse num ponto diferente, o seguimento do sistema iniciaria mais cedo, se o ponto fosse mais favorável à receção da irradiância direta (mais à Este) ou mais tarde, se o posicionamento fosse mais desfavorável (mais à Oeste) em relação ao ponto real em o sistema se posicionou.

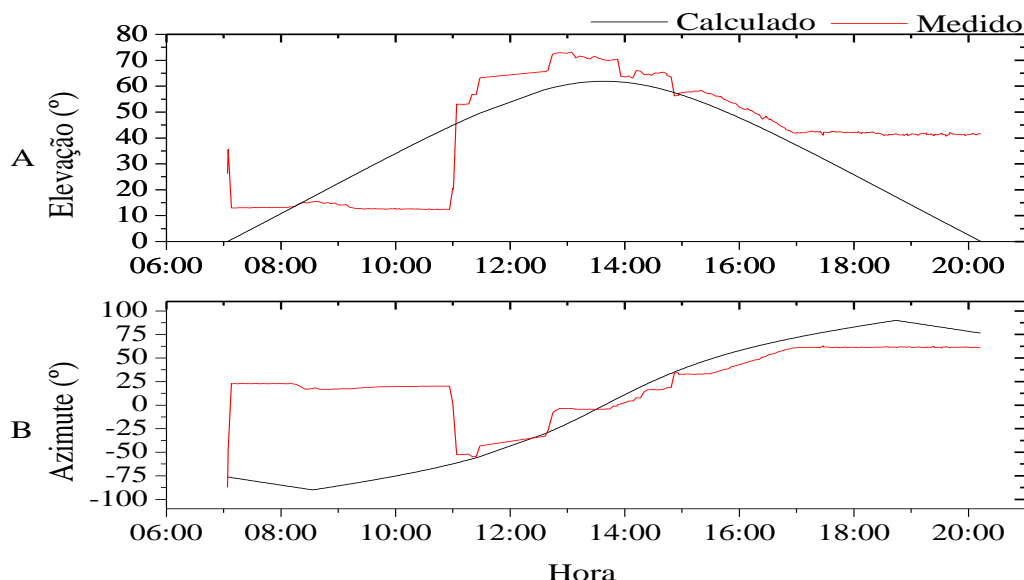


Figura 5.9. Trajetória do Sol e do sistema de seguimento no dia 24/08: A- Comparação dos ângulos de elevação solar calculados e medidos no sistema. B- Comparação dos ângulos de azimuth solar calculados e medidos no sistema.

A Figura 5.10 ilustra os desvios dos eixos do seguidor em relação ao teórico, para o dia 24 de Setembro. Para este dia, os desvios máximos acontecem logo ao início do dia, após os interruptores de fim de curso serem desativados. Há uma diferença máxima de cerca de 20° para o eixo de elevação e cerca de 100° para o eixo de azimuth. Vê-se que o seguidor entra em movimento nos instantes em que a irradiância direta ainda é nula, o que provocou um desvio muito significativo no início do dia. Por volta das 11h, o desvio diminui nos dois eixos dado que o seguidor começa a seguir a trajetória do Sol. Após esse período, mesmo com a variabilidade da irradiância direta, o eixo de elevação se mantém próximo do ângulo teórico. A diferença no eixo azimuthal é maior mas nunca superior a 20°

e constata-se que durante a maior parte do período de tarde, o seguidor está sempre atrasado, em relação a trajetória teórica do Sol.

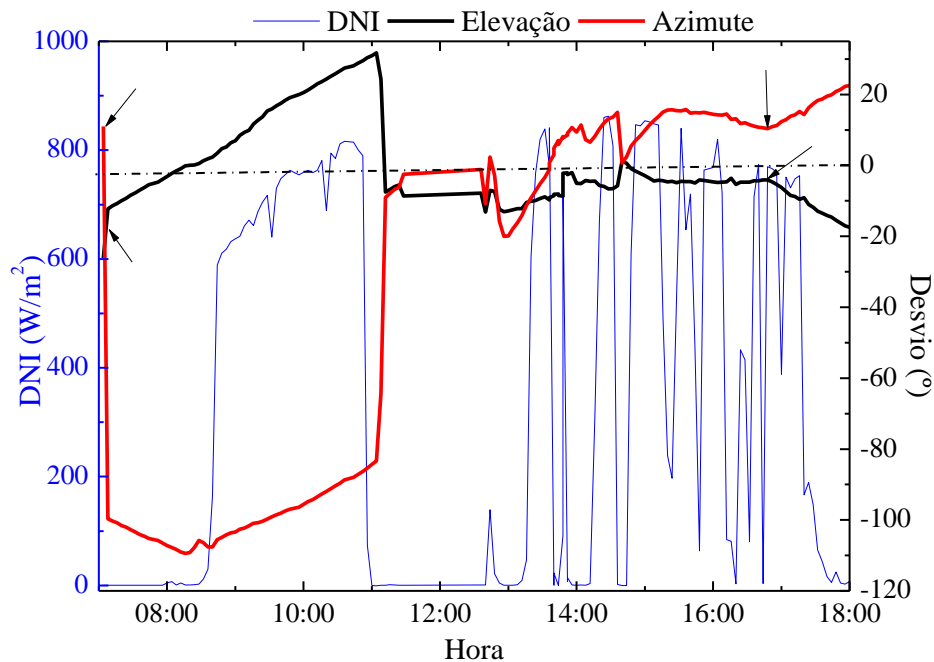


Figura 5.10. Desvio dos eixos do sistema de seguimento em relação a trajetória teórica para o dia 24/08.

A otimização do sistema para os dias com estas características passa pela implementação do sistema de controlo híbrido, ou seja, dotado de controlo *open-loop* e *closed-loop*. Assim, além do sistema funcionar recorrendo aos sinais dos sensores, pode corrigir o seu posicionamento recorrendo aos cálculos teóricos da trajetória do Sol e movendo a plataforma para a posição correta, de forma independente e garantindo assim que o sistema se mantém próximo da rota do Sol em todos os instantes. Para os dias de céu limpo este tipo de controlo não é necessário, como se nota pela análise feita anteriormente. Pelo contrário, esse tipo de implementação pode tirar partido da “procura” da zona mais clara do céu para aumentar a produção energética do sistema.

O controlo *open-loop* por si só constitui uma solução mais fiável do que o controlo *closed-loop*, já que tem em conta as condições temporais na tomada de decisão. O controlo *closed-loop* tem como principal problema a acumulação de erros visto que depende muito dos dados de relógio para o cálculo astronómico da posição do Sol no posicionamento da estrutura. Assim, só deve ser implementado quando há muito rigor na metodologia utilizada. A minimização dos erros introduzidos pelo calendário também podem ser minimizadas caso se tenha uma rede de internet disponível de onde se pode retirar os dados corretos, mais precisamente a hora do dia e o dia do ano.

Como foi mencionado na secção 3.5, para os dias de nebulosidade é ainda preferível posicionar a estrutura que contém os módulos horizontalmente, de modo a aproveitar o máximo da radiação difusa. Mas para que a implementação desta solução seja viável é necessário que os dados medidos pela estação meteorológica sejam utilizados pelo Arduino como variáveis de entrada adicionais para detetar os instantes em que há céu limpo, realizando o seguimento solar, os instantes em que há muita nebulosidade em que se posiciona os módulos para o zénite local ou ainda detetar uma nuvem “passageira” em que apenas é necessário procurar uma zona mais clara. Assim, além do seguidor se comportar de forma diferente de acordo com a disponibilidade da irradiância direta, seria possível escolher diferentes modos de operação. A principal dificuldade na implementação desse método no projeto passa pela não comunicação entre o sistema de controlo e a estação meteorologia, pelo que não é possível conhecer as condições do tempo em tempo real.

## 5.2 Produção de energia

A Figura 5.11 ilustra as curvas de potência instantânea do sistema de seguimento para a primeira semana experimental, onde se pode verificar diferentes tipos de curvas, de acordo com a disponibilidade da energia solar. Comprovada pela análise da Figura 5.1 que diferencia os dias em termos da qualidade da radiação solar, constata-se uma maior produção nos dias de céu limpo (21 e 25 de setembro), em que as curvas apresentam um formato mais característico de um sistema de seguimento. Nos outros dias verifica-se alguma variabilidade na produção de energia, derivada da presença de nuvens no céu. Demonstra ainda a estimativa de produção de um sistema fixo instalado no mesmo local, em condições ótimas de orientação e inclinação, conseguida a partir dos dados de irradiância medidas pela estação meteorológica e estimada a partir da equação 25, explicado na secção 4.3.2. Verifica-se que a estimativa de produção do sistema fixo é sempre inferior ao sistema de seguimento real, seja nos dias de céu limpo assim como nos dias de céu nublado, o que significa que existe um melhor aproveitamento da irradiância disponível por parte do seguidor solar.

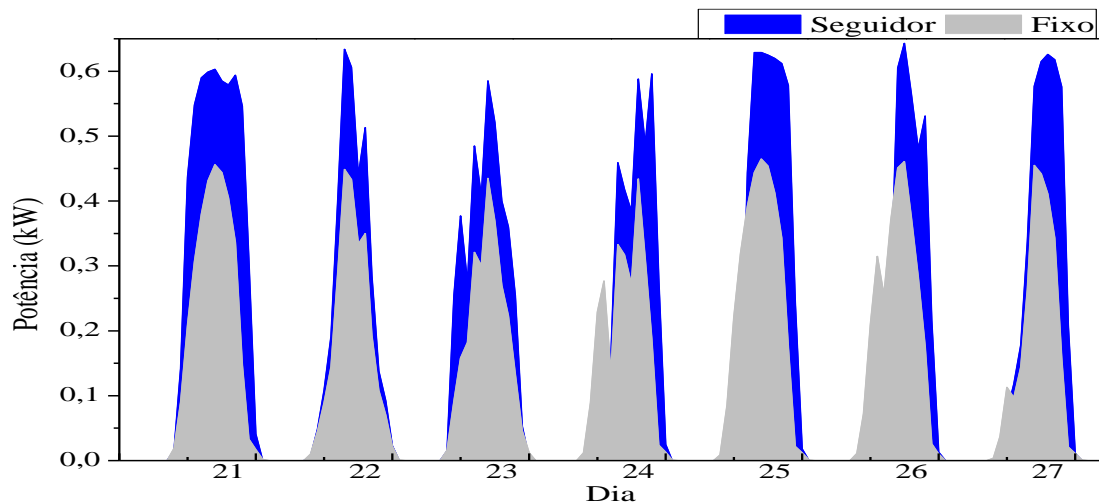


Figura 5.11. Comparação da produção do sistema de seguimento de dois eixos com a estimativa de produção de um sistema fixo entre 21 e 27 de agosto de 2015.

A terceira semana de seguimento solar resultou num maior aproveitamento por parte do sistema, visto que houve mais dias de céu limpo ou dias com menos nebulosidade (Figura 5.3), relativamente a primeira semana, como se pode comprovar pelas curvas de produção representadas na Figura 5.12. Em qualquer dos dias a potência instantânea aproxima-se da potência instalada de 0,63 kW, independentemente de ser um dia de céu limpo ou um dia nublado.

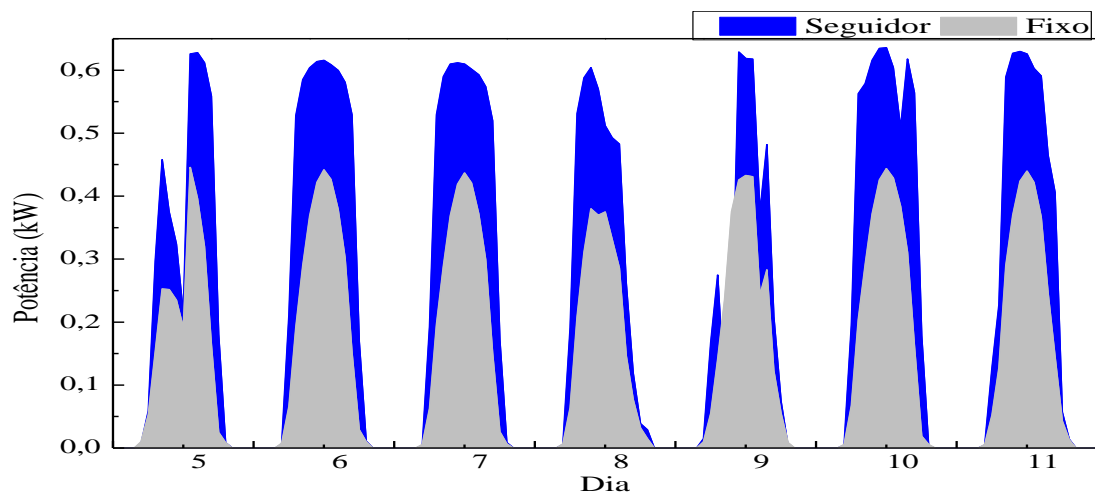


Figura 5.12. Comparação da produção do sistema de seguimento de dois eixos com a estimativa de produção de um sistema fixo entre 05 e 11 de setembro de 2015.

Seguidamente apresenta-se o estudo mais detalhado da produção do sistema para os dias com características diferentes, através da análise dos casos de estudo referidos anteriormente e cuja qualidade do seguimento foi previamente estudada.

### 5.2.1 1º Caso de estudo: Dia de céu limpo

Como consequência do bom seguimento conseguido no dia 6 de setembro, a Figura 5.13 mostra a variação de potência do sistema ao longo do mesmo dia. Pode-se verificar que o sistema se encontra próximo da potência máxima durante a maior parte do tempo, excetuando o início e o fim do dia em que a intensidade da irradiância é inferior e quando o sistema de seguimento está limitado fisicamente através dos interruptores de fim de curso. À medida o Sol avança na sua trajetória, o sistema o acompanha, aumentando de forma significativa a sua eficiência de produção de energia. Ilustra-se ainda na mesma figura a estimativa de produção de um sistema de seguimento ideal, determinado através da equação 27 e a estimativa de produção de um sistema fixo (secção 4.3.2). Através da comparação das duas curvas relativas ao seguimento comprova-se que o seguidor conseguiu maximizar a produção durante todo o dia. O resultado da estimativa da produção de um sistema fixo é similar ao esperado, aumentando até o meio-dia solar, momento em que atinge o seu pico de produção e diminuindo a partir deste ponto. Mesmo ao meio-dia solar este sistema não atinge a potência máxima instalada, dado que se encontra com um ângulo de inclinação de 35°, diferente do ângulo de elevação solar para este instante, neste dia do ano.

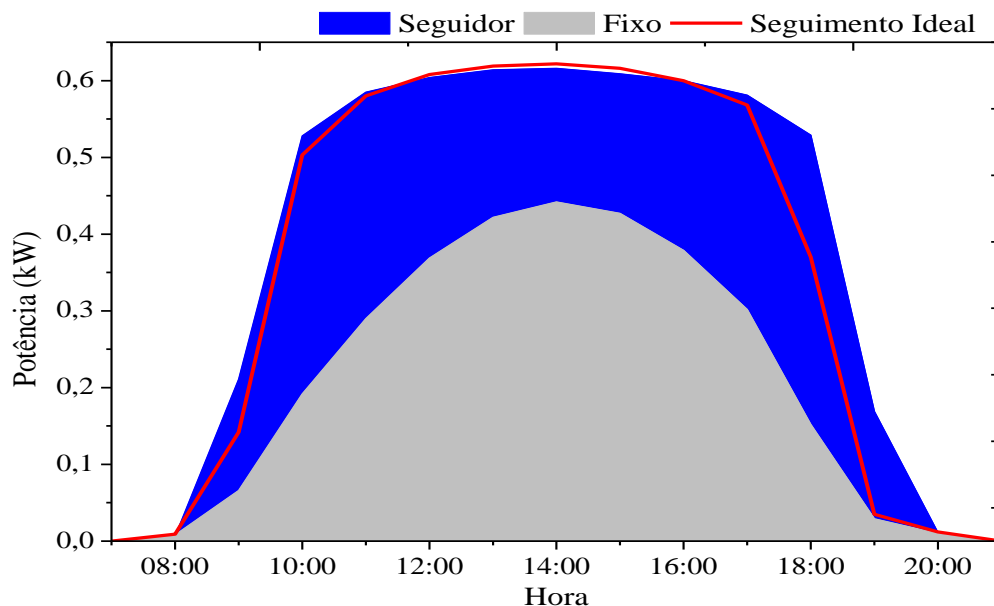


Figura 5.13. Comparação da produção do sistema de seguimento de dois eixos com a estimativa de produção de um sistema com seguimento ideal e com um sistema fixo no dia 06/09.

Pode então concluir-se que a produção do sistema com seguimento é muito superior, como se esperaria. Mesmo nos períodos pós início e precedente ao fim do dia, nos quais o seguimento é limitado, a produção é significativamente superior pois o posicionamento dos módulos, apesar de não ser perpendicular ao Sol, é melhor do que no sistema fixo. A estimativa de produção diária para o sistema fixo realizada através da irradiância medida foi de 3.09 kWh, enquanto que o sistema real com seguimento biaxial produziu 5.66 kWh, o que resulta num ganho de cerca de 45.5%. O sistema de seguimento ideal registou uma produção total de 5.29 kWh, pelo que o ganho em relação ao sistema fixo foi de 41.6%. Tendo em conta que o modelo utilizado para a estimativa da produção é muito simples, os valores apresentados são aceitáveis.



### 5.2.2 2º Caso de estudo: Dia de céu nublado

O posicionamento inicial do sistema para o dia em análise penaliza a produção do sistema de forma significativa, como mostra a Figura 5.14. Dado que durante grande parte da manhã, o sistema não está direcionado para o Sol, a potência instantânea é muito baixa, até o ponto onde se inicia o seguimento. Ainda assim, vê-se que a potência do sistema não se mantém no máximo durante todo o tempo, mesmo após o início do seguimento, devido a nebulosidade existente. Comparando as duas curvas de seguimento vê-se que se o seguidor se posicionasse corretamente no período inicial do dia, a produção teria sido muito significativo, como se comprova pela curva do seguimento ideal.

A mesma Figura 5.14 ilustra a estimativa de produção do sistema fixo, de onde se pode concluir que este produz energia no período inicial do dia ao contrário do sistema de seguimento que foi penalizado pelo mau posicionamento. A partir do instante em que se inicia o seguimento, há uma grande diferença de produção dos dois sistemas, ainda que, limitada pela passagem de nuvens. Durante o resto do dia as curvas de produção dos dois sistemas seguem a mesma tendência, apresentando apenas valores diferentes, dado que o sistema de seguimento se encontra melhor posicionado face ao Sol, em relação ao sistema fixo.

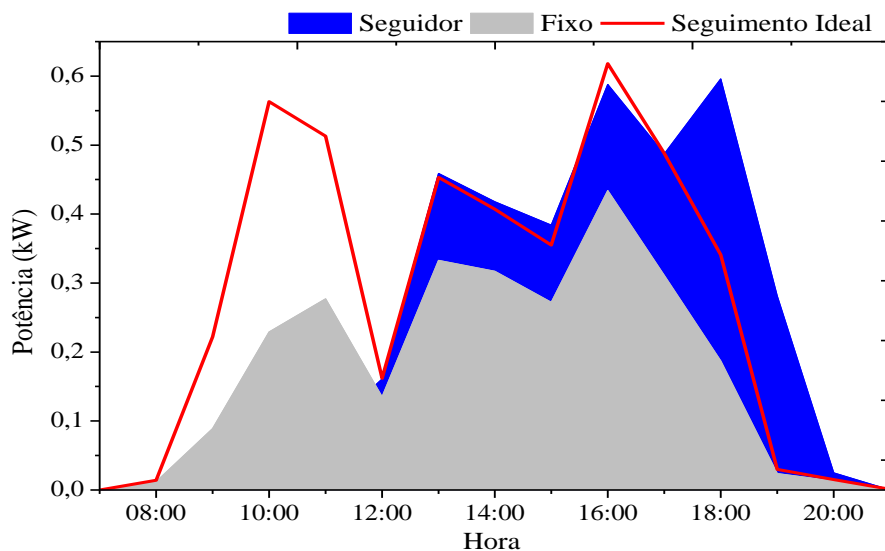


Figura 5.14. Comparação da produção do sistema de seguimento de dois eixos com a estimativa de produção de um sistema com seguimento ideal e com um sistema fixo no dia 24/08.

Para este dia o sistema dotado de seguimento biaxial registou uma produção total de 3.58 kWh, enquanto que a estimativa para o sistema fixo resultou num total de 2.63 kWh de energia produzida. A produção do sistema de seguimento ideal registou um valor total de produção de 4.18 kWh. A comparação destes valores representa um ganho de cerca de 26.5%, por parte do sistema de seguimento real e cerca de 37% por parte do seguidor ideal, de onde se comprova que o seguidor esteve muito abaixo do seu potencial de produção nesse dia. A existência de seguimento durante o resto do dia compensou o mau posicionamento no início do mesmo mas, comparando estes valores com os de um dia de céu limpo, tanto o sistema de seguimento como o sistema fixo afastam-se dos valores ótimos de produção.

### 5.2.3 Resultados gerais de produção de energia

Durante a campanha experimental, com a duração de 22 dias, pôde-se observar vários dias com as características dos dias em análise anteriormente, ou seja, dias de céu limpo em que a produção de energia foi elevada e dias de céu nublado, correspondendo a um valor de energia produzida mais reduzida.

A Figura 5.15 ilustra a produção de energia para todos os dias em análise, tanto para o sistema de seguimento real como as estimativas para o sistema de seguimento ideal e o sistema fixo. A Figura 5.16 ilustra o respetivo ganho de energia em relação ao sistema fixo, para todos os dias em análise.



A maior produção do sistema registou-se no dia 3 de setembro, com um valor de 5.91 kWh produzidos, excedendo a produção do sistema fixo em cerca de 45.2%. Outros dias considerados semelhantes em termos de produção foram os dias 21 de agosto e 6 (analisado anteriormente), 7 e 10 de setembro, todos apresentando valores muito superiores aos outros dias e um ganho superior a 40% em relação ao sistema fixo. Estes valores correspondem aos dias em que o sistema de seguimento funcionou de forma muito eficiente, com níveis de irradiância direta mais elevados, ou seja, dias de céu limpo. Para todos estes dias o ganho real do sistema em relação ao fixo foi sempre superior ao estimado pelo modelo para o seguidor de dois eixos, o que comprova a alta eficiência do sistema.

Contrariamente a estes dias, verificaram-se dias em que a produção total diária apresenta valores médios de 3.5 kWh, como por exemplo os dias 24 e 26 de setembro, correspondendo a dias com céu muito nublado. A passagem das nuvens, por si só constitui uma penalização na produção de energia para os dois sistemas e origina erros de posicionamento que agravam ainda mais a produção do sistema de seguimento. Comparando os dias 24 e 26 de setembro, produziu-se um total de 3.59 kWh e 3.58 kWh, em que os ganhos em relação ao sistema fixo, ainda assim foram de 26.5% e 15.9%, respetivamente. Estes valores mostram que o dia 26 foi mais afetado pelas nuvens em termos de posicionamento, visto que produção é igual para os dois dias, mas a diferença de produção para o sistema fixo diminui cerca de 10%. Se os dias fossem afetados de forma semelhante, visto que a produção do sistema fixo aumenta, o mesmo deveria acontecer com o de seguimento, facto que não se verificou. Em relação ao sistema ideal, para esses dias verifica-se um ganho de 37.1% e 36.9% respetivamente, comparativamente ao sistema fixo. Esse facto comprova que o seguidor não conseguiu maximizar a produção nestes dias.

Ainda pela análise da Figura 5.15 vê-se que a produção do sistema de seguimento é superior a estimativa de produção do sistema fixo, em qualquer um dos dias. Isto significa que houve seguimento solar todos os dias, diferenciando apenas na qualidade, visto que em alguns dias maximizou-se a produção através da boa qualidade de seguimento e noutros dias houve menor qualidade de seguimento, dando origem a uma produção também menor, que se deveu a existência de nuvens e aos erros de seguimento. Destes dois fatores, só se pode atuar na correção dos erros de posicionamento para aumentar o rendimento do sistema, dado que o primeiro corresponde a um fator natural.

Durante o período em análise sistema de seguimento produziu um total de 96.34 kWh, que correspondeu a cerca de 34.1% de ganho em relação ao sistema fixo, com um valor total de 63.53 kWh de energia produzida. O seguimento ideal estimado resulta numa produção total de 101.61 kWh, valor que não se afasta do valor real observado.

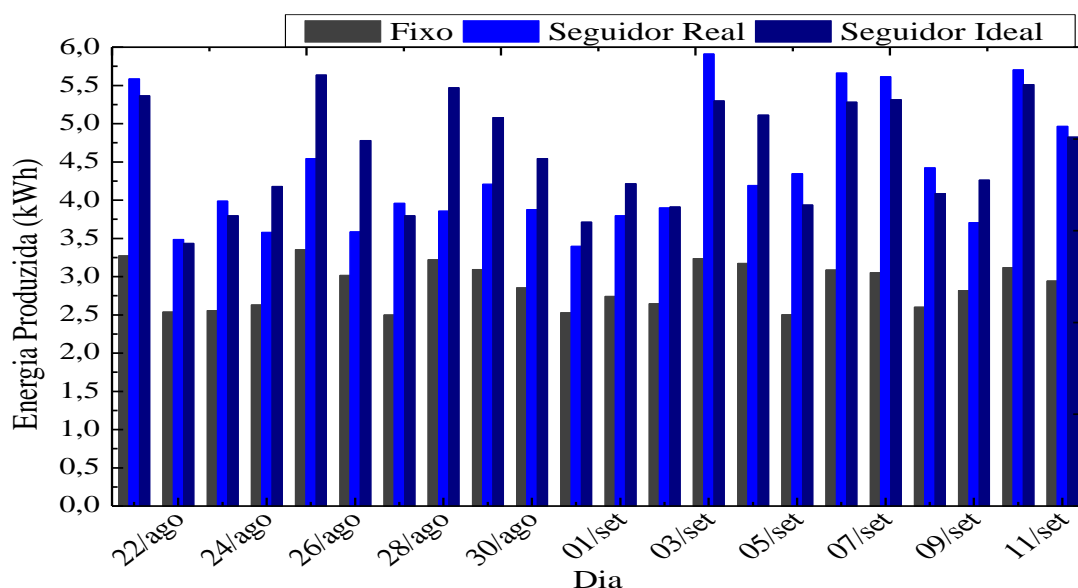


Figura 5.15. Produção de energia do sistema de seguimento real e ideal e do sistema fixo para todos os dias da campanha experimental.

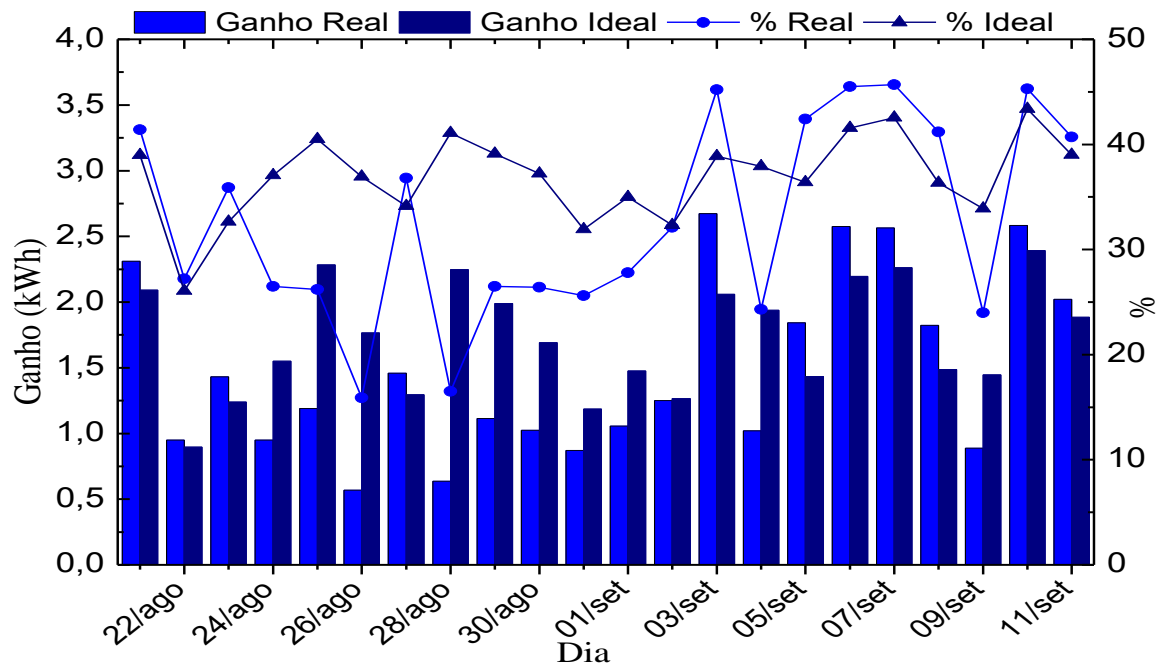


Figura 5.16. Ganhos do sistema de seguimento real e da estimativa ideal em relação ao sistema fixo para todos os dias da campanha experimental.

Atendendo ao fato dos valores de produção do sistema fixo serem derivados apenas dos dados de radiação recolhidos pela estação meteorológica instalada no local, devido a inexistência de um sistema real, deve-se considerar que estes são valores sobre-aproximados dado que a produção de um sistema real é afetada por outros fatores externos como a temperatura dos módulos, a degradação das células e a eficiência das mesmas. O ganho total do sistema de seguimento em relação ao sistema fixo apresentou ser bastante significativo validando a metodologia utilizada apesar das dificuldades de posicionamento que demonstrou nos dias mais nublados.

Além da comparação feita entre o sistema de seguimento solar com o sistema fixo convencional, recorreu-se ao *software* de dimensionamento de sistemas solares fotovoltaicos -PVsyst- para a estimativa de energia produzida por um sistema de seguimento de dois eixos e por um sistema fixo com as mesmas características do sistema real, com o objetivo de obter mais informações acerca do desempenho elétrico e da qualidade de seguimento do mesmo. A estimativa foi conseguida utilizando as informações reais dos módulos fotovoltaicos, do inversor de energia e da localização.

Como resultado dessa análise obteve-se um total de 99.17 kWh para o sistema de seguimento e 69.89 kWh para o sistema fixo, para o mesmo período de funcionamento do sistema real. Estes valores resultam numa produção normalizada de cerca de 7.15 kWh/kWp/dia e 5.04 kWh/kWp/dia, para o sistema de seguimento e o sistema fixo, respetivamente, como ilustra a Figura 5.17. Com uma produção de 96.34 kWh, a energia normalizada do sistema de seguimento real apresenta o valor de 6.95 kWh/kWp/dia, enquanto que a estimativa de produção do sistema fixo resultou em 4.58 kWh/kWp/dia.

Pela análise dos valores apresentados conclui-se que o valor de produção do sistema de seguimento aproxima-se da produção ótima, visto que a diferença entre este e o sistema de seguimento simulado pelo PVsyst apresenta uma diferença de apenas 2.8%, ainda que é necessário ter em conta que o programa de simulação utiliza dados históricos de radiação solar e não os dados medidos pela estação.

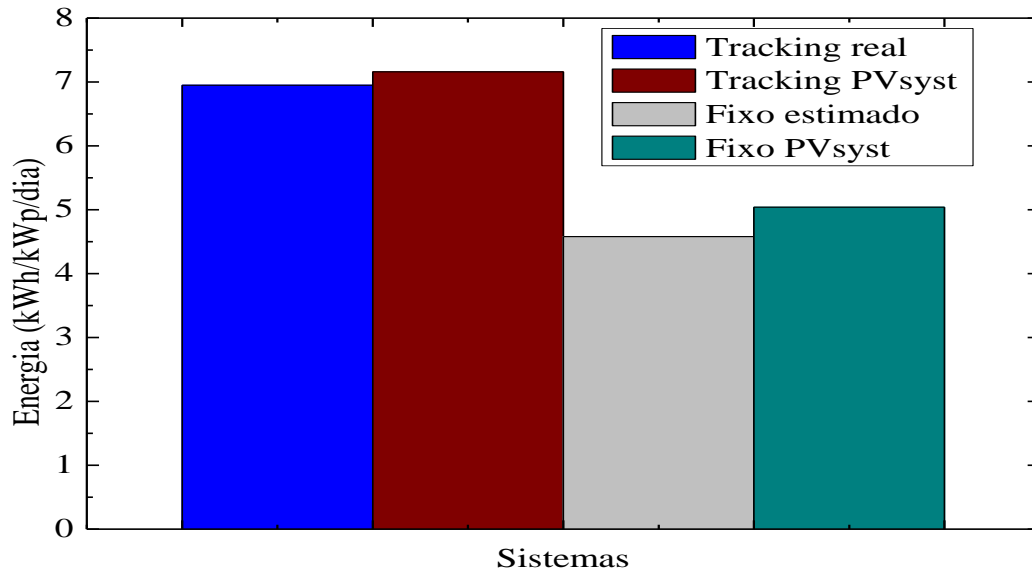


Figura 5.17. Energia normalizada do sistema de seguimento e do sistema fixo.

### 5.3 Consumo de energia

Sendo um sistema de seguimento solar ativo, é necessário também analisar o consumo de energia por parte dos atuadores e do sistema de controlo. Nesta secção analisa-se primeiramente os casos de estudo específicos e posteriormente apresenta-se os resultados gerais de consumo de energia do sistema durante o período experimental.

#### 5.3.1 1º Caso de estudo: Dia de céu limpo

A Figura 5.18 representa o perfil de consumo energético do sistema para o dia em análise. Os valores representam a soma do consumo dos atuadores, recolhidos pelo medidor *Cloogy* instalado no sistema e de uma sobre-estimativa de consumo do controlador, dado que o sistema Arduino, alimentado a 5V e com uma corrente de consumo máxima de 50 mA, resulta numa potência de apenas 0.25 W que não é lido pelo sensor por ser um valor extremamente reduzido. Visto que o sistema de controlo está sempre ligado, o consumo diário apresenta o valor estimado de cerca de 6 Wh.

O perfil de consumo mostra que durante a noite e até as primeiras horas do dia, o consumo de energia corresponde apenas ao consumo do Arduino. A partir do momento em que o sistema de seguimento entra em funcionamento, por volta das 10h, o consumo de energia aumenta devido ao acionamento dos atuadores. Durante o processo de seguimento, o consumo de energia horário é sempre crescente, o que pode indicar um aumento de esforço e consequente aumento de consumo de energia por parte do sistema, à medida que este avança na direção Oeste, atingindo um máximo de 9 Wh. Entre as 16h e as 17h o consumo é inferior, dado que os atuadores atingem o limite máximo de seguimento e os interruptores de fim de curso são ativados. A partir desse instante o sistema permanece imóvel até o pôr-do-sol, momento em que o sistema retrocede para a posição inicial do dia seguinte, como se pode constatar pelo aumento do consumo de energia por volta das 20h.

O consumo total para este dia é de 60.2 Wh que, comparado com o valor de energia produzida de 5660 Wh, representa apenas cerca de 1.1% da mesma. Este valor de consumo também representa cerca de 2.6% do ganho de produção pelo sistema de seguimento em relação à estimativa do sistema fixo. Os dados de consumo de energia são muito reduzidos dado que o sistema de controlo atua nos atuadores lineares apenas por alguns segundos em cada ajuste de posicionamento do sistema. Ainda assim, é necessário ter em conta o intervalo de medição do *Cloogy* que é de 5 em 5 segundos e consequentemente pode não detetar os picos de consumo dos motores, o que representaria um consumo de energia mais elevado por parte do sistema. É de se notar que a fração de energia consumida apresentada depende da produção, de modo inversamente proporcional. Assim caso a

produção do sistema ou a potência instalada fosse maior, para o mesmo valor de consumo, a fração apresentada seria menor.

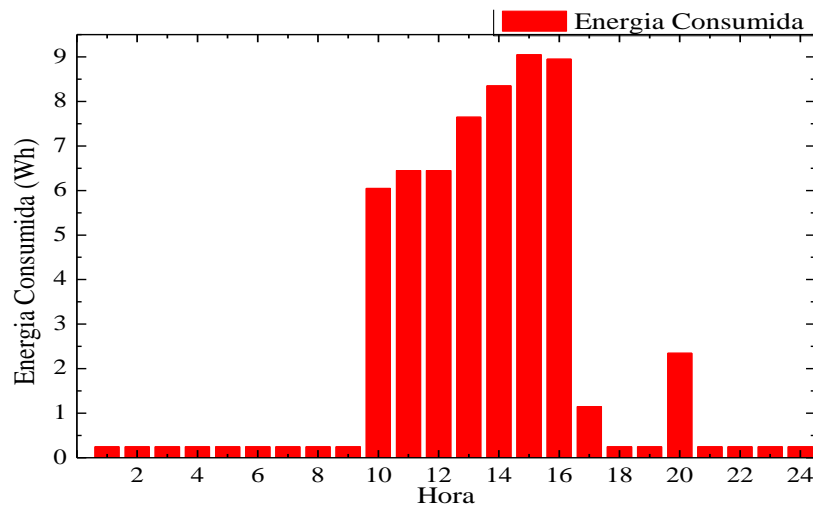


Figura 5.18. Consumo de energia do sistema medido no dia 06/09.

Pela análise conjunta dos dados de seguimento, produção e consumo de energia conclui-se que num dia de céu limpo, o sistema em estudo funciona de forma muito eficaz e eficiente.

### 5.3.2 2º Caso de estudo: Dia de céu nublado

A Figura 5.19 representa consumo medido pelo *Cloogy*, para o dia de céu nublado. Quando o dia se inicia, há um aumento do consumo correspondente ao instante em que a plataforma entrou em movimento, “a procura” de uma zona mais clara do céu (comprovado pela Figura 5.9). Visto que o sistema se mantém estático no período seguinte, a energia consumida baixa novamente, correspondendo apenas ao funcionamento do Arduino, até que o sistema começa a se movimentar e consequentemente há um aumento no consumo, que atinge um máximo de 11Wh entre as 13h e as 14h. Quando o seguimento termina o consumo de energia baixa novamente e apenas aumenta por volta das 20h, período em que o sistema retrocede para o posicionamento inicial do dia seguinte.

O consumo total para este dia foi de 50,4Wh, representando uma fração de 1.4% da energia total produzida pelo sistema de seguimento e cerca de 5.3% do ganho do sistema de seguimento em relação ao sistema fixo. Estes valores são mais elevados comparativamente ao dia de céu limpo dado que a produção é menor e o consumo se mantém na mesma ordem de grandeza.

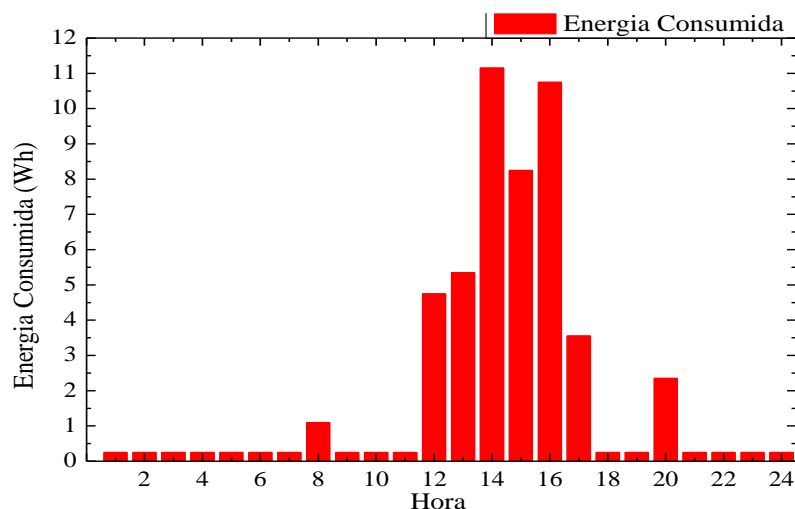


Figura 5.19. Consumo de energia do sistema medido no dia 24/08.

Pode-se concluir que mesmo que as condições não sejam as mais favoráveis para a realização do seguimento com sensores de luz, a quantidade de energia gasta devido aos movimentos aleatórios e menos precisos por parte do seguidor não atinge valores elevados e a energia produzida compensa esse mesmo gasto. Contudo, o sistema consegue manter-se próximo da trajetória do Sol e produzir mais energia do que um sistema fixo exposto às mesmas condições, com um gasto de energia bastante aceitável.

### 5.3.3 Resultados gerais de consumo de energia

Na Figura 5.20 apresenta-se os valores gerais de consumo e a fração de energia consumida pelo sistema em relação à produção total, onde se verifica que existiu falhas no sistema de medição em alguns dos dias, sendo o consumo apresentado correspondente apenas ao valor estimado para o Arduino. Em qualquer dos dias atuou-se no sistema de ajuste pelo que a ausência de valores de consumo não representa ausência de seguimento por parte do sistema, mas sim erros de leitura, de comunicação ou de registo por parte do *Cloogy*, pelo facto dos diferentes componentes comunicarem entre si via *wireless* e possivelmente ter ocorrido problemas na internet.

O maior consumo de energia deu-se no dia 27 de setembro, com um valor de 75Wh, correspondente a 1.89% da energia produzida pelo sistema de seguimento e cerca de 5.14% do ganho de energia do sistema de seguimento em relação ao sistema fixo, para o mesmo dia. No dia 26 verificou-se um consumo semelhante ao do dia 27 mas as frações de consumo em relação ao total produzido e ao ganho em relação ao fixo são superiores (2.03% e 8.68%, respetivamente), o que significa uma maior ineficiência do sistema, ou seja, no dia 26 o sistema esteve mais longe do seu potencial ótimo de produção.

Os valores de maior consumo de energia são geralmente relativos aos dias de menor produção em que o sistema se desvia da trajetória ótima do Sol devido à existência de nebulosidade, consumindo mais energia na correção do seu posicionamento. Nos dias de maior produção, os valores de consumo estão mesma ordem de grandeza, excetuando os dias em que não se registaram dados. Quanto menor a diferença de produção entre o sistema de seguimento e o fixo, menor é o ganho e sendo que os valores de energia consumida são semelhantes para a maior parte dos dias, maior será a penalização para estes dias, e portanto o aproveitamento é menos eficiente. Existem outros dias em que o consumo de energia foi cerca de metade do valor máximo, como por exemplo o dia 28 de agosto, em que a produção do sistema se aproximou da do dia anterior, no entanto a energia consumida reduziu-se para 37Wh. Isto significa que não houve o seguimento durante uma parte do dia dada a presença de nuvens, o que se confirma pela diferença entre os valores de produção do sistema de seguimento e do sistema fixo, que são próximos um do outro, originando um ganho de apenas 16.5%.

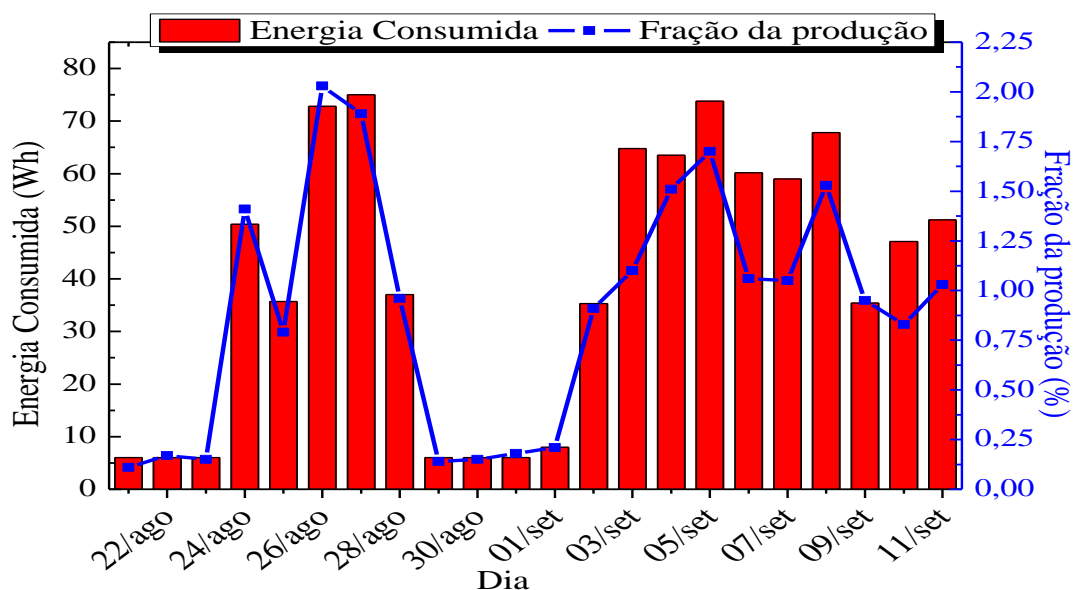


Figura 5.20. Energia consumida e a respetiva fração da produção do sistema de seguimento.

O consumo total registado durante o período de avaliação de desempenho do sistema foi de 873Wh que corresponde a uma fração de 0.91% da energia total produzida, verificando-se um valor de cerca de 175 kWh produzidos por kWp por kWh consumido ( $175 \text{ kWh}_{\text{prod}}/\text{kWp}/\text{kWh}_{\text{cons}}$ ) por parte do sistema de seguimento. De forma geral verifica-se que o seguimento realizado pelo sistema, ainda que não esteja totalmente otimizado, permite o aumento da produção de energia com um consumo de energia muito baixo, aproximando-se dos dispositivos existentes no mercado, tal como o sistema da WS Energia, em que este valor é de  $187 \text{ kWh}_{\text{prod}}/\text{kWp}/\text{kWh}_{\text{cons}}$  [35].

É necessário ter em conta que o seguidor em estudo não está completamente otimizado, dado que ocorreram algumas falhas em alguns dos dias em análise. Outro fator importante na penalização da produção foi a existência de muitos dias nublados mesmo estando num período de verão. Isto contribui para que o valor de energia produzida por unidade de energia consumida pelo sistema seja menor, ainda assim muito próximo. Em termos económicos, a solução implementada é muito mais viável do que o sistema original da WS Energia.

## 6. Conclusões e trabalhos futuros

Este projeto, com a finalidade de desenvolver um sistema de seguimento solar ativo de baixo custo, foi concluído com sucesso e revelou excelentes resultados em termos de desempenho e produtividade, funcionando em pleno e de forma fiável, validando assim a metodologia utilizada.

O Arduíno assume o papel de elemento chave na prototipagem do sistema eletrónico de controlo e no desenvolvimento do algoritmo de seguimento solar. Com uma programação muito simples, o microcontrolador permitiu atuar no sistema de ajuste da plataforma de seguimento com elevada precisão e recolher todos os dados necessários para a caracterização do sistema, através dos vários sensores instalados, com os quais é possível interagir de forma fácil. A placa Arduíno constituiu uma mais-valia para o projeto por ser muito barato e funcionar de forma fiável durante todo o período experimental.

Os principais resultados analisados permitem concluir que o sistema de seguimento implementado, através do método de comparação de sinais de sensores de luz e da procura do brilho do disco solar é uma solução viável, em detrimento do ajuste apenas pelo cálculo teórico do posicionamento solar, através das equações da geometria do Sol, utilizada por muitos sistemas existentes. A qualidade do seguimento é excelente em dias de céu limpo, em que o seguidor acompanha a trajetória do Sol do início ao fim do dia, mantendo os módulos fotovoltaicos normais aos raios solares, de forma a maximizar a área útil de conversão de energia solar em energia elétrica. Nestes dias verificou-se desvios máximos de apenas 10°. Nos dias de céu nublado o sistema também se comporta muito bem, desviando-se da trajetória do Sol nos instantes em que este se encontra obstruído, procurando a zona mais clara do céu e mantendo nessa posição até que encontre novamente a rota do Sol. Ainda assim, nesses dias é necessário implementar um sistema de correção do posicionamento através do cálculo teórico da posição solar, de modo a garantir que este não se desvie excessivamente e em que a produção não compense o gasto de energia relativo aos movimentos aleatórios do seguidor. Em termos de produção obtiveram-se ganhos máximos 45% nos dias de céu limpo e mínimos de 15% nos dias de céu nublado, relativamente a um sistema com as mesmas características e com orientação e inclinação fixos. Em termos de consumo de energia, obteve-se um valor máximo de cerca de 2% da energia produzida, valor este que se verifica nos dias com existência de nebulosidade e consequentemente, dias de menor produção.

Estes valores revelam que se conseguiram bons resultados, mesmo recorrendo a componentes simples e de baixo custo e não sendo necessária a realização de um seguimento muito preciso, visto que não se trata de um sistema de concentração solar. O sistema desenvolvido aproxima-se dos sistemas de seguimento de dois eixos existentes no mercado, tanto ao nível de produção como de consumo de energia.

Os trabalhos futuros passam pelo estudo mais aprofundado dos tipos de sensores de luz a serem utilizados (como por exemplo os foto-díodos, que reagem a luz de forma diferente), de modo a determinar a posição do disco solar com maior precisão, principalmente nos dias de céu nublado. A altura da pala de separação dos sensores é também um elemento importante no processo de seguimento, pelo que futuramente é também importante realizar um estudo da variação da precisão com a altura da pala e também com diferentes configurações. Para os dias de céu nublado é necessário ainda a implementação do método de posicionamento *closed loop*, em que é necessário substituir os *reed switches* por outro tipo de sensores de contagem de pulsos dos atuadores lineares, visto que estes revelaram alguma fragilidade e grande imprecisão na contagem. O conhecimento da posição do atuador é de extrema importância na implementação desse método, pelo que é necessário encontrar uma melhor solução. Só assim será possível implementar um método de seguimento solar misto, combinando os sensores de luz com a posição teórica do Sol, de modo a aumentar ainda mais a eficiência do seguimento, maximizando a produção de energia. A configuração híbrida constitui a melhor solução para a realização do seguimento solar, em que um dos pontos principais passa pela interação do sistema de controlo com os equipamentos de medição da radiação de modo a detetar as condições reais do tempo, num dado instante e agir em conformidade com esse mesmo estado, pelo que é necessário uma aprendizagem dos métodos de seguimento e a sua implementação.





## Referências bibliográficas

- [1] B. Khadidja, K. Dris, A. Boubeker, and S. Noureddine, “Optimisation of a Solar Tracker System for Photovoltaic Power Plants in Saharian Region, Example of Ouargla,” *Energy Procedia*, vol. 50, pp. 610–618, 2014.
- [2] C. S. Chin, a. Babu, and W. McBride, “Design, modeling and testing of a standalone single axis active solar tracker using MATLAB/Simulink,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 3075–3090, 2011.
- [3] Y. Yao, Y. Hu, S. Gao, G. Yang, and J. Du, “A multipurpose dual-axis solar tracker with two tracking strategies,” *Renew. Energy*, vol. 72, pp. 88–98, Dec. 2014.
- [4] N. a. Kelly and T. L. Gibson, “Increasing the solar photovoltaic energy capture on sunny and cloudy days,” *Sol. Energy*, vol. 85, no. 1, pp. 111–125, 2011.
- [5] H. Bentaher, H. Kaich, N. Ayadi, M. Ben Hmouda, a. Maalej, and U. Lemmer, “A simple tracking system to monitor solar PV panels,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 78, pp. 872–875, 2014.
- [6] Q. Fu, “Radiation (Solar),” *Elsevier Sci.*, no. 1981, pp. 1–5, 2003.
- [7] “Solar Radiation Outside the Earth’s Atmosphere [PVEducation.” [Online]. Available: <http://pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/solar-radiation-outside-earths-atmosphere>. [Accessed: 18-Nov-2015].
- [8] J. a. Duffie, W. a. Beckman, and W. M. Worek, *Solar Engineering of Thermal Processes, 4nd ed.*, vol. 116. 2003.
- [9] Z. Sen, *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques*. Istanbul, Turkey, 2007.
- [10] C. J. Chen, *Physics of Solar Energy*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- [11] K. Jäger, O. Isabella, A. Smets, R. Swaaij, and M. Zeman, *Solar Energy: Fundamentals, Technology, and Systems*. Netherlands, 2014.
- [12] G. N. Tiwari and Swapnil Dubey, “Solar Radiation,” in *Fundamentals of Photovoltaic Modules and their Application*, no. 2, 2011.
- [13] “Pyrheliometer \_ Eko Instruments.” [Online]. Available: <http://eko-eu.com/products/solar-radiation-and-photonic-sensors/pyrheliometer>. [Accessed: 06-Jan-2016].
- [14] M. Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*. Vancouver, Canada, 2006.
- [15] SolarPower Europe, “Global Market Outlook for Solar Power 2015-2019,” *Glob. Mark. Outlook*, p. 32, 2014.
- [16] B. I. Gaëtan, Masson and B. I. Mary, Brunisholz, “Snapshot of global photovoltaic markets,” *Rep. IEA PVPS*, pp. 1–19, 2016.
- [17] DGES, “DIREÇÃO GERAL DE ENERGIA E GEOLOGIA – Estatísticas rápidas - Renováveis,” Portugal, 2015.
- [18] EU-JRC-IET, “JRC’s Institute for Energy and Transport - PVGIS - European Commission,” *EU Joint Research Centre*, 2012. [Online]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>. [Accessed: 15-Dec-2015].
- [19] G. Stapleton and S. Neill, *Grid-connected Solar Electric Systems*. New York, United States, 2012.
- [20] SMA, “Solar Stand-Alone Power and Backup Power Supply,” pp. 1–44, 2009.

- [21] NREL, “Connecting Your Solar Electric System to the Utility Grid,” 2002.
- [22] P. A. Lynn, *Electricity from sunlight: an introduction to photovoltaics*. United Kingdom: John Wiley & Sons, 2011.
- [23] A. K. S. David Tan, “Handbook for Solar Photovoltaic Systems,” *Energy Mark. Authority, Singapore Publ.*, pp. 4–9, 2011.
- [24] S. Sumathi, L. A. Kumar, and P. Surekha, *Solar PV and Wind Energy Conversion Systems*. Coimbatore, India: Springer, 2015.
- [25] N. a. Kelly and T. L. Gibson, “Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system,” *Sol. Energy*, vol. 83, no. 11, pp. 2092–2102, 2009.
- [26] G. Gaspar, F. Reis, L. Pina, G. Sorasio, J. Wemans, and M. C. Brito, “Exploring one-axis tracking configurations for CPV application,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1407, no. May, pp. 285–288, 2011.
- [27] K. Chong and C. Wong, “General Formula for On-Axis Sun-Tracking System,” *InTech*, p. 31, 2010.
- [28] A. J. Narendrasinh Parmar, A. N. Parmar, and V. S. Gautam, “Passive Solar Tracking System,” *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng. Website www.ijetae.com ISO Certif. J.*, vol. 9001, no. 1, pp. 67–88, 2005.
- [29] V. Poulek, “New low cost solar tracker,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 33, no. 3, pp. 287–291, 1994.
- [30] D. S. Pereira, “Avaliação de Desempenho de Protótipo de Seguimento Solar Passivo Biaxial,” University of Lisbon - Faculty of science, 2015.
- [31] “Solar tracker performance and economics in Australia - Solar Choice.” [Online]. Available: <http://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers/>. [Accessed: 05-Jan-2016].
- [32] N. H. Helwa, A. B. G. Bahgat, A. M., “Maximum Collectable Solar Energy by Different Solar Tracking Systems,” *Energy Sources*, vol. 22, no. 1, pp. 23–34, 2000.
- [33] C.-Y. Lee, P.-C. Chou, C.-M. Chiang, and C.-F. Lin, “Sun Tracking Systems: A Review,” *Sensors*, vol. 9, no. 5, pp. 3875–3890, 2009.
- [34] F. Reis, V. Corregidor, M. Brito, R. Rodrigues, J. Wemans, and G. Sorasio, “Power Generation and Energy Yield using Doublesun Photovoltaic Solar Concentration,” *Proc. 24th EU PVSEC, Hamburg, Ger.*, pp. 803–806, 2009.
- [35] D. Pera, “Campus Solar FCUL - Manual de Instruções do Utilizador.” .
- [36] H. Mousazadeh, A. Keyhani, A. Javadi, H. Mobli, K. Abrinia, and A. Sharifi, “A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 8, pp. 1800–1818, 2009.
- [37] “SuperJack Actuator datasheet.” .
- [38] SMA Solar Technology AG, “Sunny Boy SB 1100LV,” no. 1, p. 80, 2001.
- [39] Q. A. Al-Haija, M. Al Tarayrah, H. Al-Qadeeb, and A. Al-Lwaimi, “A tiny RSA cryptosystem based on arduino microcontroller useful for small scale networks,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 34, no. Eicm, pp. 639–646, 2014.
- [40] Arduino Team, “Arduino - ArduinoBoardUno,” 2011. [Online]. Available: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>. [Accessed: 15-Oct-2015].
- [41] “Adafruit Data logging shield for Arduino - v1.0.” [Online]. Available:

- <https://www.adafruit.com/products/1141>. [Accessed: 15-Oct-2015].
- [42] “Leapfrog Creatr XL 3D printer | Leapfrog 3D Printers,” 2015. [Online]. Available: <http://www.lpfrg.com/leapfrog-creatr-xl-3d-printer>. [Accessed: 20-Oct-2015].
- [43] “Pololu - LSM303D 3D Compass and Accelerometer Carrier with Voltage Regulator.” [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/2127>. [Accessed: 20-Oct-2015].
- [44] “Cloogy.” [Online]. Available: <http://www.cloogy.com/en/about/>. [Accessed: 15-Nov-2015].

